



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Anforderungen an ein GIS-Tool zur Berechnung einer
netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer“

verfasst von / submitted by

Michael Gerdenitsch, BA

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Inhalt

Inhalt	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungen	viii
Kurzfassung	ix
Abstract	x
Vorwort und Danksagung	xi
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
1.2. Problemstellung und Relevanz	1
1.3. Wissenschaftliche Fragestellungen	2
1.4. Methodische Vorgangsweise	2
1.5. Aufbau der Arbeit	3
2. Klimaschutz und Verkehrsemissionen	5
2.1. Klimaschutz im globalen Kontext	5
2.2. Klimaschutz in der EU	6
2.3. Klimaschutz in Österreich	7
2.4. Der österreichische Verkehrssektor	8
3. Fiskalmaßnahmen zur Ökologisierung des Personenverkehrs	12
3.1. Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen	12
3.2. Umweltsteuern im Verkehrssektor	14
3.2.1. Allgemeines	14
3.2.2. Steuern im MIV	16
4. Soziale Determinanten der Autoabhängigkeit	18
4.1. Kinder	18
4.2. Ältere Menschen	19
4.3. Personen mit körperlicher Behinderung	19
5. Erreichbarkeit und GIS-Netzwerkanalyse	20
5.1. Definition und Ausprägungen der Erreichbarkeit	20

5.2.	Graphentheorie	22
5.2.1.	Mathematische und begriffliche Grundlagen	22
5.2.2.	Bedeutende Erkenntnisse	24
5.2.3.	Kürzeste Wege	25
5.3.	GIS-Netzwerkanalyse	28
5.3.1.	Das Netzwerkdatenmodell	28
5.3.2.	Ermittlung der optimalen Route.....	30
5.3.3.	Vehicle-Routing-Problem	31
5.3.4.	Suche des nächstgelegenen Standortes	32
5.3.5.	Einzugsgebietsanalyse.....	33
5.3.6.	Start-Ziel-Kostenmatrix	34
5.3.7.	Location-Allocation-Analyse	35
6.	Stand der Forschung.....	37
6.1.	Bedeutung von GIS für Erreichbarkeitsanalysen	37
6.2.	Wahl der geeigneten Datengrundlage.....	39
6.3.	Quantifizierung der Autoabhängigkeit	40
6.4.	Klassifizierung der Haltestellen des ÖV.....	43
6.5.	Erreichbarkeit der Daseinsvorsorge.....	45
7.	Untersuchungsgebiet Steiermark	46
7.1.	Bevölkerungsentwicklung und -verteilung.....	46
7.2.	Verkehrsentwicklung und -infrastruktur.....	48
7.3.	Daseinsvorsorge.....	49
8.	Technische Ressourcen	50
8.1.	Software	50
8.2.	Datensätze	51
9.	Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer	53
9.1.	Vorbereitungen	55
9.1.1.	Landesgrenze und ÖV-Linien	55
9.1.2.	ÖV-Haltestellen	57
9.1.3.	Daseinsvorsorge	62
9.1.4.	Straßen- und Wegenetz	64

9.2. Netzwerkanalysen.....	68
9.2.1. Network Dataset.....	68
9.2.2. ÖV-Haltestellen	70
9.2.3. Daseinsvorsorge	73
9.3. Gewichtungen	75
9.3.1. ÖV-Haltestellen	75
9.3.2. Daseinsvorsorge	80
9.4. Steuerberechnungen.....	84
9.5. Automatisierung	90
10. Ergebnisse	93
10.1. Die Landeshauptstadt Graz	94
10.2. Das regionale Zentrum Leoben	95
10.3. Die ländliche Gemeinde Wartberg im Mürztal	96
10.4. Informationsabfrage mittels Pop-ups.....	97
11. Probleme und weiterer Handlungsbedarf	101
12. Zusammenfassung und Ausblick	105
13. Literatur.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Änderung der Emissionsmengen (inkl. Emissionshandel) zwischen 1990 und 2017 nach Sektoren in Österreich	9
Abb. 2: Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors 1990 bis 2017 und Zielpfad gemäß Klimaschutzgesetz 2013 bis 2020	9
Abb. 3: Anteile der Verkehrsleistung im inländischen Personenverkehr 1990 und 2017 (ohne Kraftstoffexport und internationalem Flugverkehr)	10
Abb. 4: Anteil der Umweltsteuern am gesamten Aufkommen an Steuern und Sozialabgaben in Prozent, Vergleich Österreich und EU-28, 2002 bis 2017.....	14
Abb. 5: Anteilmäßige Aufsplittung der Umweltsteuern, 2018.....	15
Abb. 6: Begriffliche Grundlagen eines Graphen.....	23
Abb. 7: Graphen zum Königsberger Brückenbeispiel von Leonhard Euler	24
Abb. 8: Schritte 1 und 2 des Dijkstra-Algorithmus.....	26
Abb. 9: Schritte 3 und 4 des Dijkstra-Algorithmus.....	26
Abb. 10: Schritte 5 und 6 des Dijkstra-Algorithmus.....	27
Abb. 11: Schritte 7 und 8 des Dijkstra-Algorithmus.....	27
Abb. 12: Zwei mögliche Kantenübergänge an einem Kreuzungsknoten	29
Abb. 13: Beispielhafte Darstellung einer optimalen Route von Punkt A nach B in einem Straßennetz	30
Abb. 14: Beispielhafte Darstellung der Streckenverläufe eines Vehicle-Routing-Problems...	31
Abb. 15: Beispielhafte Darstellung der Ereignisorte samt ihrer nächstgelegenen Einsatzstellen.....	32
Abb. 16: Beispielhafte Darstellung der Einzugsgebiete einiger Standorte	33
Abb. 17: Beispielhafte Darstellung der Verbindungsachsen einer Start-Ziel-Kostenmatrix ...	34
Abb. 18: Beispielhafte Darstellung einer Standortanalyse mit dem Location-Allocation-Tool	35
Abb. 19: Graphische Gegenüberstellung der drei Distanzberechnungsmethoden	38
Abb. 20: Prozess zur Bildung der ÖV-Güteklassen.....	44
Abb. 21: Bevölkerungsveränderung in den steirischen Bezirken, 2007-2017.....	47
Abb. 22: Erreichbarkeit von ÖV-Haltestellen für die steirische Bevölkerung, klassifiziert nach der Anzahl täglicher Abfahrten je Haltestelle, wobei der Haltestelleneinzugsbereich einem Radius von 1.000 Metern entspricht.....	48
Abb. 23: Workflow der praktischen Ausarbeitung	53

Abb. 24: Vollständiges Modell aus dem ArcGIS Pro ModelBuilder, nach Prozessphasen klassifiziert	54
Abb. 25: Vorbereitung der Landesgrenze und ÖV-Linien in Modellansicht.....	55
Abb. 26: Einstellungsfenster der Tools „Project“ und „Feature Class to Feature Class“	56
Abb. 27: Einstellungsfenster der Tools „Dissolve“ und „Clip“	56
Abb. 28: Landesgrenze der Steiermark	57
Abb. 29: Vorbereitung der Haltestellen in Modellansicht	58
Abb. 30: Einstellungsfenster der Tools „Add Field“ und „Calculate Field“	59
Abb. 31: Die beiden Einstellungsfenster des Tools „Feature Class to Feature Class“	60
Abb. 32: Einstellungsfenster der Tools „Feature Class to Feature Class“ und „Calculate Field“	61
Abb. 33: ÖV-Haltestellen in der Steiermark	62
Abb. 34: Vorbereitung der Einrichtungen der Daseinsvorsorge in Modellansicht	63
Abb. 35: Einstellungsfenster der Tools „Feature To Point“ und „Merge“	63
Abb. 36: Daseinsvorsorge in der Steiermark	64
Abb. 37: Vorbereitung des Netzwerks in Modellansicht	65
Abb. 38: Einstellungsfenster des Tools „Feature Class to Feature Class“	67
Abb. 39: Verkehrsgraph in der Steiermark	68
Abb. 40: Erstellung des Network Dataset in Modellansicht	68
Abb. 41: Einstellungsfenster der Tools „Create Feature Dataset“, „Create Network Dataset“ und „Build Network“	69
Abb. 42: Netzwerkanalysen der Haltestellen in Modellansicht	70
Abb. 43: Einstellungsfenster der Tools „Add Location“ und „Make Service Area Analysis Layer“	71
Abb. 44: Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit guter Bedienungs-qualität, Netzwerkdistanz bis 400 Meter in Dunkelgrün und über 400 bis 800 Meter in Hellgrün	72
Abb. 45: Export der Erreichbarkeitspolygone je Haltestellenklasse in Modellansicht.....	73
Abb. 46: Netzwerkanalysen der Daseinsvorsorge in Modellansicht.....	74
Abb. 47: Erreichbarkeitspolygone der Volksschulen, Netzwerkdistanz bis 400 Meter in Dunkelviolet und über 400 bis 800 Meter in Hellviolet	74
Abb. 48: Export der Erreichbarkeitspolygone je Einrichtungsklasse in Modellansicht.....	75
Abb. 49: Gewichtung und hierarchische Überlagerung der Haltestellenklassen in Modellansicht.....	76

Abb. 50: Prinzip der hierarchischen Überlagerung und Ausstanzung der Haltestellen-Erreichbarkeitspolygone.....	76
Abb. 51: Einstellungsfenster der Tools „Erase“ und „Alter Field“	77
Abb. 52: Einstellungsfenster der Tools „Add Fields (multiple)“ und „Delete Field“	78
Abb. 53: Gewichtung der Daseinsvorsorge in Modellansicht.....	81
Abb. 54: Einstellungsfenster der Tools „Add Field“ und „Intersect“	82
Abb. 55: Überlappende Erreichbarkeitspolygone der Daseinsvorsorge	84
Abb. 56: Berechnung der Verkehrsemissionssteuer in Modellansicht	85
Abb. 57: Einstellungsfenster des Tools „Add Fields (multiple)“ zur Bereitstellung aller Attribute, die für die steuerliche Berechnung benötigt werden	87
Abb. 58: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Berechnung der Gewichtungssumme der Einrichtungen und Anzahl der PKW	88
Abb. 59: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen und Berechnung des Basissteuersatzes	89
Abb. 60: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer	90
Abb. 61: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge im Nordosten von Graz	94
Abb. 62: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge im Nordosten von Leoben.....	95
Abb. 63: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge in Wartberg im Mürztal	96
Abb. 64: Pop-up-Fenster der monatlichen Verkehrsemissionssteuer in einem Stadtteil von Graz	98
Abb. 65: Pop-up-Fenster der monatlichen Verkehrsemissionssteuer in Mautern in der Steiermark	99
Abb. 66: Pop-up-Fenster einer Straße	99
Abb. 67: Pop-up-Fenster einer Haltestelle	100
Abb. 68: Pop-up-Fenster einer Apotheke.....	100
Abb. 69: Treppeneffekt im Polygonlayer.....	101
Abb. 70: Abrupte Übergänge im Polygonlayer.....	102
Abb. 71: Geometrische Zerteilung im Polygonlayer.....	103

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Dimensionen der Erreichbarkeit	21
Tab. 2: Mathematische Gegenüberstellung der drei Distanzberechnungsmethoden in Form der Einwohnerzahlen und Pufferflächen	38
Tab. 3: Gewichtung der Indikatoren, unterteilt nach Indikatorensets	42
Tab. 4: Einstufung der Daseinsvorsorge in eine gute, mäßige und schlechte Erreichbarkeit	45
Tab. 5: Übersicht über sämtliche in der Masterarbeit herangezogenen Quelldatensätze.....	51
Tab. 6: Eignung der Straßen- und Wegkategorien für die Netzwerkanalysen, oberer Tabellenteil.....	65
Tab. 7: Eignung der Straßen- und Wegkategorien für die Netzwerkanalysen, unterer Tabellenteil.....	66
Tab. 8: Gewichtungswerte und ihr Verhältnis zueinander in Abhängigkeit von Bedienungsqualität und Erreichbarkeit der Haltestellen	80
Tab. 9: Gewichtungswerte in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit pro Einrichtungstyp der Daseinsvorsorge	83

Abkürzungen

ACCC – Austrian Council on Climate Change

BEV – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

BMLFUW – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

EU – Europäische Union

FME – Feature Manipulation Engine

GIP – Graphenintegrationsplattform

GIS – Geoinformationssystem, Geographisches Informationssystem

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

IT – Informationstechnologie

KFZ – Kraftfahrzeug

LKW – Lastkraftwagen

MIV – Motorisierter Individualverkehr

MÖSt – Mineralölsteuer

NDCs – Nationally Determined Contributions

NECPs – National Energy and Climate Plans

NMIV – Nichtmotorisierter Individualverkehr

NoVA – Normverbrauchsabgabe

ÖAW – Österreichische Akademie der Wissenschaften

ÖPNV – Öffentlicher Personennahverkehr

OSM – OpenStreetMap

ÖV – Öffentlicher Verkehr

ÖVDAT – Österreichisches Institut für Verkehrsdateninfrastruktur

PKW – Personenkraftwagen

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit widmet sich der Problematik, dass der gesellschaftliche Umstieg vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr politische Maßnahmen erfordert, ohne dabei jedoch autoabhängige Bevölkerungsgruppen zu benachteiligen. Zu diesem Zweck wurde eine monatliche Verkehrsemissionssteuer entwickelt, welche die fußläufigen Distanzen zu Haltestellen der Umweltverbünde sowie zu Einrichtungen der Daseinsvorsorge berücksichtigt. Dadurch sind die BewohnerInnen gut erschlossener Städte, die mit einer dichten Struktur an Angeboten des täglichen Bedarfs ausgestattet sind, für die Privatnutzung ihres Autos tendenziell zu einer höheren Abgabe angehalten. Auf der anderen Seite sind die KFZ-BesitzerInnen in peripheren Regionen, in denen es sowohl an öffentlichen Verkehrsanbindungen als auch an Einrichtungen der Daseinsvorsorge mangelt, dank geringer Abgaben oder Steuerbefreiung entlastet. Zudem werden die integrierten nähräumlichen Erreichbarkeitsverhältnisse eines zu untersuchenden Haushalts durch soziale Faktoren, die ebenso einen signifikanten Einfluss auf die örtliche Autoabhängigkeit ausüben, ergänzt.

Die Umsetzung ging anhand mehrerer GIS-Netzwerkanalysen vonstatten, im Zuge derer pro Haltestelle des öffentlichen Verkehrs sowie pro Supermarkt, Allgemeinmediziner, Volksschule und Apotheke ein Einzugsgebiet in zweistufiger Entfernung berechnet wurde. Die daraus ermittelten Polygone wurden anschließend mit Gewichtungswerten hinterlegt, deren Höhe den jeweiligen Haltestellenqualitäten, Einrichtungstypen und Distanzen entsprach. Mittels gezielter Zusammensetzung dieser Polygone konnten jene Flächenanteile, die sich räumlich überlagerten, samt ihrer Gewichtungen aufsummiert werden. Zum Schluss wurden diese kumulierten und alle übrigen Werte mit den sozialen Faktoren sowie einem Basissteuersatz multipliziert, woraus die angepasste Verkehrsemissionssteuer pro Gebietseinheit resultierte. Um die herangezogenen Daten und Parameter nachträglich jederzeit ändern zu können, fand der gesamte Ablauf in einer speziellen Softwareumgebung statt, welche die graphische Strukturierung und Automatisierung der Prozesse ermöglichte.

Abstract

The present master's thesis focuses on the problem of social switching from private means of transport to public transport that presupposes political measures that are not treating the car-dependent social groups less favourably. For this purpose a monthly transport-related emission tax was developed taking into account the walking distance to public transport stops as well as to public service facilities. Thus the city dwellers, who are well-served in terms of public transport and have a tremendous range of facilities offering the articles of daily use at hand, are obliged to higher tax charges if they continue to use their vehicles for private purposes. On the other hand, the vehicle owners, who are living in remote regions with a dramatic shortage of transport accessibility and the absence of an adequate number of public service facilities, are either exempt from paying the transport-related emission tax or have to pay a minimal fee. In addition to the spatial accessibility of the examined households, the implemented social factors, that are also having a significant impact on the conspicuous regional car dependency, became an integral extension to the calculation process carried out.

Within the implementation process that proceeded thanks to numerous GIS-based network analyses, a service area has been calculated in a two-stage distance-regulating process per each public transport stop, supermarket, general practitioner, primary school as well as pharmacy. The derived polygons were subsequently combined with the weight values that have been determined by the distances as well as by the quality of public transport stops and the type of public service facilities. With the help of the specific composition of the above mentioned polygons it was possible to sum up the weight values of the areas that were spatially overlapping. In the end, the accumulated values and all other values were multiplied by the social factors and the basic rate of taxation: as a result, a customized transport-related emission tax was calculated using this data. In order to be able to make any subsequent alterations to the data and parameters at any time, the entire process was executed in a special software environment that made it possible to structure the graphics and automate the processes.

Vorwort und Danksagung

Das Jahr 2020 war geprägt von der Corona-Pandemie, die unsere medizinischen Kapazitäten, ökonomische Stabilität und sozialen Gewohnheiten in unerwarteter Intensität auf die Probe stellte. Gleichzeitig verblüfften uns Zeitungsartikel und Postings in Social Media darüber, wie die Umwelt infolge heruntergefahrener Industrie und reduziertem Verkehrsaufkommen förmlich aufatmen konnte. Plötzlich waren Großstädte nach langjähriger Luftverschmutzung wieder frei von Smog – die kurzfristige Erfüllung einer Vision klimaschützender AkteurInnen.

Obwohl dieses Phänomen im Kampf gegen die globale Erwärmung lediglich ein Tropfen am heißen Stein war, hat sich der kausale Zusammenhang zwischen gesellschaftlichen Aktivitäten und ökologischen Auswirkungen auf anschauliche Weise bestätigt. Doch nach wie vor werden wir mit mahnenden Worten zum Klimawandel aus Wissenschaft, Politik und Bürgerinitiativen konfrontiert. Kaum ein Tag vergeht ohne mediale Berichterstattung, die unsere Aufmerksamkeit auf die Verursachung von Treibhausgasen und zunehmende Gefahr durch Dürre, Hitzeperioden, Hurrikane oder die Erhöhung des Meeresspiegels zu lenken versucht. In diesem Kontext spielt der Verkehrssektor als ein Hauptemittent der menschengemachten Luftschadstoffe eine fundamentale Rolle.

Neben diversen Plänen und Maßnahmen der Regierung soll das zukünftige 1-2-3-Klimaticket einen Umstieg vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr bewirken und somit einen Beitrag zum österreichischen Klimaschutz leisten. Bei diesem Ticket handelt es sich um einen kostenintensiven Pull-Faktor, welcher die Preisattraktivität der Umweltverbünde steigern und dadurch VerkehrsteilnehmerInnen anziehen soll. Auf der anderen Seite stellt sich jedoch die Frage, wie sich ein Push-Faktor gestaltet, der die VerkehrsteilnehmerInnen vom Auto in die öffentlichen Transportmittel drängt. Im Idealfall können als Nebeneffekt finanzielle Einnahmen generiert werden, welche die Finanzierung des 1-2-3-Klimatickets sowie anderer klimaschützender Maßnahmen unterstützen.

Ein Gegenstand möglicher Push-Faktoren wäre beispielsweise die Mineralölsteuer, die man theoretisch anheben könnte, um die Bevölkerung immer mehr von der Straße auf die Schiene zu manövrieren und zugleich lukrative Abgabepolitik zu betreiben. Das Problem dabei liegt jedoch auf der Hand, denn solch eine uneingeschränkte Verteuerung des motorisierten Verkehrs würde alle Bevölkerungsgruppen gleichermaßen belasten – unabhängig von ihrer persönlichen Wohn- und Lebenssituation. Schon die Beobachtung des eigenen sozialen Umfelds zeigt, dass es Familien und Einzelpersonen gibt, die auf das Auto mehr angewiesen sind als andere. So macht es etwa einen beträchtlichen Unterschied, ob ein Vater von Kleinkindern am Land einen weiten Weg zum nächsten Supermarkt bzw. zur nächsten Bushaltestelle – die vielleicht nur wenige Male am Tag bedient wird – zurücklegen muss oder ob eine kinderlose Studentin mit der Straßenbahn lediglich fünf Minuten ins belebte Stadtzentrum benötigt.

Angestoßen durch die genannten Umstände entstand die Idee, einen Ansatz für eine monatliche Verkehrsemissionssteuer zu entwickeln, die mithilfe einer GIS-Netzwerkanalyse räumliche Parameter der Autoabhängigkeit berücksichtigt. Obwohl der Einsatz der Geoinformation den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellt, wurden zumindest ansatzweise auch soziale Einflussfaktoren integriert. Auf diese Weise ist der Vater am Land zu einer sehr geringen Abgabe verpflichtet oder gar völlig steuerbefreit, wohingegen es der Studentin in einer Stadt

mit guten Infrastrukturen überlassen bleibt, ob sie sich in Anbetracht höherer Abgaben einen PKW zur Privatnutzung leisten will. Letzterer Fall ist jedoch nicht als eine Art Repressalie aufzufassen, sondern stellt als Gegenleistung zum verzichtbaren Gebrauch eines Autos lediglich einen finanziellen Beitrag zum Klimaschutz dar.

Somit hoffe ich, dass die vorliegende Masterarbeit langfristig zur Ökologisierung des österreichischen Verkehrssektors beitragen kann und in diesem Zusammenhang den Nutzen der Geoinformation zur Geltung bringt.

Die Ausarbeitung war nicht nur fachlich anspruchsvoll, sondern auch von privaten Herausforderungen begleitet – insbesondere durch die monatelange Trennung von meiner Frau infolge pandemiebedingter Grenzsicherungen. Für die mentale Unterstützung in der Zeit unserer gegenseitigen Entbehrung sowie für das Korrekturlesen der finalisierten Arbeit gebührt ihr mein größter Dank.

Ebenso möchte ich an Herrn Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl für die Betreuung meiner Masterarbeit und seine konstruktiven Ratschläge ein großes Dankeschön aussprechen.

Meine Danksagung richtet sich auch an meine weißrussische Schwiegermutter, die mir meine Arbeit aus der Ferne mit vielerlei Köstlichkeiten versüßt hat.

Nicht zuletzt bin ich auch meinen Eltern und weiteren Familienmitgliedern mit herzlichem Dank verbunden, die mir während meines Studiums immer tatkräftig zur Seite gestanden sind.

Baden bei Wien, Dezember 2020

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielsetzung

Das hohe globale Verkehrsaufkommen und die damit einhergehenden Treibhausgasemissionen tragen signifikant zur Erderwärmung bei. Die erforderlichen Maßnahmen zum Schutze unseres Weltklimas sind mit einem tiefgreifenden Wandel von Wirtschaft und Gesellschaft verbunden, welcher diese und zukünftige Generationen vor große Herausforderungen stellen wird.

Seit einigen Dekaden werden politische Initiativen ergriffen, um den Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels in verschiedensten Bereichen entgegenzuwirken. Die Reduktion von Verkehrsemissionsmengen stellt in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag dar, den die Republik Österreich beispielsweise durch die schrittweise Umstellung des Personenverkehrs von der Straße auf die Schiene leisten will. Doch der Erfolg von Push-Faktoren im motorisierten Individualverkehr (MIV), von Pull-Faktoren hinsichtlich des öffentlichen Verkehrs (ÖV) und den damit verbundenen Finanzmittelaufwendungen setzt umfassende und fachübergreifende Strategien voraus – und zwar auf eine sozial verträgliche und gerechte Weise. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit ist es mein Anliegen, die vielschichtigen Werkzeuge der Geoinformation zu nutzen, um die Mobilitätswende effektiv und langfristig zu unterstützen.

Gesamtziel der Masterarbeit war die Entwicklung eines GIS-basierten Tools zur Berechnung einer monatlichen Verkehrsemissionssteuer, welche an die jeweilige Wohn- und Lebenssituation der steuerpflichtigen Personen bzw. Haushalte angepasst ist. Zu diesem Zweck standen im Zentrum der Arbeit GIS-Netzwerkanalysefunktionen, welche anhand einiger individueller Parameter zum Einsatz kamen. Bei Letzteren handelte es sich um haushaltsbezogene Angaben (Adresse des Hauptwohnsitzes und Anzahl der dort gemeldeten Personen mit eingeschränkter Mobilität), fahrzeugbezogene Angaben (Anzahl und Antriebsart der gemeldeten Kraftfahrzeuge) und die fußläufige Erreichbarkeit lokaler Haltestellen des öffentlichen Verkehrs sowie jener Einrichtungen der Daseinsvorsorge, welche häufiger aufgesucht werden. Das Tool sollte so gestaltet sein, dass die einzelnen Parameter einfach zu variieren sind und auf diese Weise verschiedene Szenarien simuliert werden können.

Zur Erreichung dieses Gesamtziels mussten zuvor einige Teilbeiträge abgeschlossen sein. Dazu zählte die räumliche Erfassung aller Haltestellen des ÖV und essenzieller Einrichtungen des täglichen Bedarfs (Supermärkte, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken), ihre Klassifizierung hinsichtlich der nähräumlichen Erreichbarkeit (und der Bedienungsqualität im Falle der Haltestellen) sowie die Aufbereitung eines fußgängertauglichen Straßen- und Wegenetzes. Schließlich kann diese Arbeit nach Erreichung des Gesamtziels einen Beitrag zu ihren beiden übergeordneten Zielen – die Reduktion verkehrsbedingter CO²-Emissionen und die Generierung von Fördermitteln für den ÖV – leisten.

1.2. Problemstellung und Relevanz

In Angesicht der vereinbarten Klimaziele ist die Politik dazu aufgefordert, wirksame Maßnahmen zur Reduktion verkehrsbedingter CO²-Emissionen zu entwickeln. Laut aktuellem

Klimaschutzbericht des Umweltbundesamtes (vgl. 2019: 7) zählt der MIV zu den Hauptverursachern von Schadstoffbelastung und Treibhausgasemissionen in Österreich. Darüber hinaus benötigt der Bund Fördermittel in ausreichender Höhe, um beispielsweise das geplante 1-2-3-Klimaticket oder den weiteren Ausbau des ÖV zu finanzieren. Als große Herausforderung erweist sich in diesem Zusammenhang die Etablierung einer viel diskutierten Emissionssteuer im MIV, ohne jedoch Bevölkerungsgruppen, die aufgrund der Lage ihres Wohnsitzes oder physischer Einschränkungen vom Personenkraftwagen (PKW) abhängiger sind als andere, zu benachteiligen.

Mit der Entwicklung eines möglichen GIS-basierten Tools sollte ein entsprechender Lösungsansatz im Rahmen dieser Masterarbeit angeboten werden.

1.3. Wissenschaftliche Fragestellungen

Entsprechend der oben angeführten Zielsetzung und Problemstellung ergab sich folgende zentrale Forschungsfrage:

- Wie kann mithilfe eines GIS ein Tool entwickelt werden, das eine vom Hauptwohnsitz abhängige Verkehrsemissionssteuer berechnet?

Im Rahmen dieser Forschungsfrage waren auch die nachfolgenden drei Arbeitsfragen zu beantworten:

- Welche Parameter sollen in die Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer miteinbezogen werden?
- Wie kann sowohl das räumliche als auch zeitliche Angebot des öffentlichen Verkehrs sowie die fußläufige Erreichbarkeit essenzieller Einrichtungen des täglichen Bedarfs in messbare Größen transformiert werden?
- Wie lässt sich die gesamte Netzwerkanalyse so automatisieren, dass am Ende nur noch die personenbezogenen Variablen angegeben werden müssen?

1.4. Methodische Vorgangsweise

Wie es die gute wissenschaftliche Praxis vorsieht, wurde vor der empirischen Untersuchung sämtliche themenrelevante Fachliteratur herangezogen, um eine fundierte theoretische Grundlage für die Beantwortung der Fragestellungen zu schaffen. In diesem Sinne wurden die zur Verfügung stehenden Publikationen analysiert und hinsichtlich ihres Bezugs zum Forschungsthema katalogisiert. Die daraus gewonnenen Informationen unterstützten nicht nur die methodische Umsetzung des praktischen Teils, sondern erwiesen sich auch als nützliche Hilfestellung für die Wahl konkreter Werte, wie etwa die nachfolgend erwähnten Klassengrenzen, Distanzintervalle und Gewichtungen.

Für die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer wurden diverse Geodaten, die in erster Linie von behördlichen Institutionen stammen, sorgfältig ausgewählt und in ArcGIS Pro aufbereitet. Dazu zählte einerseits das flächendeckende Straßen- und Wegenetz, welches in Bezug auf seine Fußgängertauglichkeit einem umfassenden Selektionsprozess

unterzogen werden musste. Daneben wurden sämtliche Haltestellen des ÖV herangezogen und nach ihrer Bedienungshäufigkeit klassifiziert, um zusätzlich die zeitliche Komponente des ÖV zu berücksichtigen. Auch die Supermärkte, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken trugen als meistaufgesuchte Einrichtungen der Daseinsvorsorge maßgeblich zur Ermittlung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer bei. Schließlich war die administrative Grenze des Bundeslandes Steiermark ebenso von Bedeutung, weil sie das Untersuchungsgebiet darstellte und somit als räumliche Abgrenzung der genannten Datensätze fungierte.

Auf dieser Grundlage konnten – wiederum in ArcGIS Pro – alle routingrelevanten Parameter eingerichtet und die Netzwerkanalysen der Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge durchgeführt werden. Pro Ort wurden zwei fußläufige Distanzintervalle in Abhängigkeit vom Objekttyp festgelegt, aus denen letztlich zwei verschiedengroße Einzugsgebiete resultierten. Letztere konnten als separate Polygonfeatures extrahiert und in weiterer Folge mit spezifischen Gewichtungsfaktoren versehen werden. Mithilfe dieser Gewichtungen war die Einbeziehung unterschiedlicher Prioritäten beim Aufsuchen der Orte gewährleistet: Denn die örtliche Autoabhängigkeit hängt nicht nur von der fußläufigen Erreichbarkeit ab, sondern wird auch von der Bedienungsqualität der entsprechenden Haltestelle und vom jeweiligen Einrichtungstyp der Daseinsvorsorge beeinflusst.

Den Netzwerkanalysen und Gewichtungen folgte die finale Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer. Nachdem die Einzugsgebiete überschritten und zu einem neuen Polygonlayer zusammengeführt wurden, konnte die Aufsummierung der Einzelgewichtungen je Polygon erfolgen. Die Summen erreichten Werte zwischen 0 und 1, deren Höhe in einer reziproken Proportionalität zur Autoabhängigkeit steht. Dies bedeutet, dass ein Wert nahe 0 auf periphere Gebiete und ein Wert nahe 1 auf urbane Zentren hinweist. Danach wurde ihre Multiplikation mit haushalts- und fahrzeugbezogenen Faktoren, wie etwa der Anzahl der gemeldeten PKW oder einem Faktor bezüglich der gemeldeten Personen mit eingeschränkter Mobilität, vorgenommen. Diese Zwischenergebnisse wurden wiederum mit einem fixen Basissteuersatz multipliziert, woraus sich schlussendlich für jedes Polygon eine spezifische monatliche Verkehrsemissionssteuer ergab.

1.5. Aufbau der Arbeit

In den ersten Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen und Rahmenbedingungen des Untersuchungsthemas erläutert. Zu Beginn dient die Darlegung der globalen, europäischen und österreichischen Klimaschutzpolitik dazu, die Relevanz und Dringlichkeit der Reduktion verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen zu veranschaulichen. Anschließend wird die Förderungs- und Abgabenpolitik Österreichs in Bezug auf den öffentlichen Verkehr bzw. motorisierten Individualverkehr diskutiert, um eine fiskalische Orientierung für die zu berechnende Verkehrsemissionssteuer zu geben. Das daran anschließende Kapitel zu den sozialen Determinanten der Autoabhängigkeit soll einen kurzen Überblick darüber verschaffen, auf welche körperlichen Mobilitätseinschränkungen im Zuge der Besteuerung zu achten ist. Danach werden die Definition und Messung der Erreichbarkeit sowie mathematische, methodische und technische Grundlagen zur GIS-Netzwerkanalyse ins Auge gefasst.

Das darauffolgende Kapitel zum Stand der Forschung stellt facheinschlägige Studien vor, die einen starken Bezug zur Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer aufweisen. Darin findet bereits eine inhaltliche Überleitung zum empirischen Teil der vorliegenden Arbeit statt, der sich zunächst dem Untersuchungsgebiet Steiermark widmet und dabei auf dessen demographischen Merkmale, verkehrlichen Infrastrukturen und Daseinsvorsorge eingeht. Sämtliche Angaben zu der verwendeten Software sowie den herangezogenen Datensätzen lassen sich im Kapitel über die technischen Ressourcen nachlesen. Daran schließt der praktische Hauptteil an, in welchem die gesamte Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer eingehend dokumentiert ist. In Ergänzung dazu folgt die Diskussion der Ergebnisse, die mittels kartographischer Darstellungen präsentiert werden. Eine kritischere Auseinandersetzung mit den erzielten Resultaten findet im Kapitel über die Probleme und den weiteren Handlungsbedarf statt. Am Ende der Arbeit lassen sich Zusammenfassung und Ausblick sowie das Literaturverzeichnis vorfinden.

2. Klimaschutz und Verkehrsemissionen

Wie eingangs erwähnt, soll mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag von Seiten der Geoinformation u. a. zur Reduktion verkehrsbedingter CO²-Emissionen geleistet werden. Aus diesem Grund ist dieses Kapitel den politischen Zielsetzungen zum Weltklima sowie dessen Gefährdung durch Verkehrsemissionen gewidmet.

Die ersten drei Subkapitel befassen sich mit dem Klimaschutz auf je einer politischen Ebene: Der globale Kontext umfasst die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, das Kyoto-Protokoll, das Pariser Übereinkommen sowie statistische Kennzahlen und Prognosen des Weltklimarates. Bei der Darlegung des Klimaschutzes in der Europäischen Union (EU) sind das Klima- und Energiepaket 2020 bzw. 2030 sowie die Klimaschutzziele bis 2050 inbegriffen. Auf der untersten politischen Ebene ist in groben Zügen die Geschichte des österreichischen Klimaschutzes vorgestellt, gefolgt von der Erläuterung des nationalen Klimaschutzgesetzes sowie der darin enthaltenen Vorgaben. Das vierte und somit letzte Subkapitel setzt sich mit dem österreichischen Verkehrssektor auseinander, dessen Treibhausgas-Reduktionsziele den völkerrechtlichen Klimaschutzbestimmungen, EU-Richtlinien sowie dem nationalen Klimaschutzgesetz unterliegen. In diesem Abschnitt sind sowohl sämtliche Statistiken zum motorisierten Individualverkehr und Verkehrsaufkommen in Österreich als auch die verursachten Mengen an Verkehrsemissionen angeführt, wobei dem Personenverkehr besondere Bedeutung zukommt.

2.1. Klimaschutz im globalen Kontext

Im Jahr 1992 erfolgte der globale Startschuss für politische Maßnahmen zum Schutz des Weltklimas: Als die Vereinten Nationen eine Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro abhielten, wurde die Klimarahmenkonvention (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) ins Leben gerufen. Dieses multinationale Abkommen, welches bis heute von fast allen Staaten der Welt ratifiziert wurde, setzt sich eine drastische Reduktion der anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen zum Ziel. In der jährlich stattfindenden Vertragsstaatenkonferenz kommen alle Vertragsparteien zusammen, um sowohl bisherige Leistungen und Entwicklungen zu evaluieren als auch weitere Maßnahmen und Zielsetzungen zu beschließen. Die wissenschaftlichen Guidelines zu den Zieldefinitionen, Emissionsberechnungen sowie zur Berichterstattung werden dabei vom Weltklimarat (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) vorgegeben. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 26, 176)

Die ersten rechtsverbindlichen Zielvorgaben für Industrieländer wurden 1997 im Zuge der dritten Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention gesetzt: Im Kyoto-Protokoll verpflichteten sich die Vertragspartner zu einer umfassenden Begrenzung und mehrjährigen Senkung ihrer verursachten Treibhausgasemissionen für die Verpflichtungsperiode 2008 bis 2012. Für die zum Zeitpunkt der Vertragsschließung 15 Mitgliedstaaten der EU bedeutete dies eine Emissionsreduktion um acht Prozent in Relation zum Referenzjahr 1990. Am Ende der Verpflichtungsperiode, in welcher die EU ihren Zielwert erreichen konnte, wurde eine Fortsetzung des 2005 in Kraft getretenen Kyoto-Protokolls beschlossen. Die 18.

Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention fand in Doha statt und besiegelte die zweite Verpflichtungsperiode, welche sich von 2013 bis 2020 erstreckt. Insgesamt willigten weltweit 38 Länder ein, ihre Treibhausgasemissionen bis 2020 um durchschnittlich 18 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Die Verpflichtung der EU, eine Minderung um 20 Prozent vorzunehmen, wurde zusätzlich im Zuge des EU Klima- und Energiepakets 2020 festgelegt. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 26f.)

Da das Kyoto-Protokoll lediglich die Industrieländer für nationale Klimaschutzbeiträge (NDCs – Nationally Determined Contributions) heranzieht, sich aber der Anteil der weltweiten Treibhausgasemissionen in den letzten Jahrzehnten immer mehr auf die Schwellen- und Entwicklungsländer verlagert hat, wurde ein neues Abkommen angestrebt (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 28): Auf der 21. Vertragsstaatenkonferenz 2015 wurde das völkerrechtlich verbindliche Pariser Übereinkommen beschlossen, welches erstmals alle Länder der Welt zur Reduktion ihrer Treibhausgase verpflichtet. Darin wurde vereinbart, den weltweiten Temperaturanstieg auf weniger als zwei Grad im Vergleich zum vorindustriellen Referenzwert zu beschränken, wobei mithilfe zusätzlicher Anstrengungen eine maximale Erwärmung um 1,5 Grad anzustreben ist. Des Weiteren müssen die Vertragspartner ihren Finanzhaushalt auf die Maßnahmen zur Minderung der Treibhausemissionen ausrichten sowie entsprechende Anpassungsstrategien für die unvermeidlichen Auswirkungen des Klimawandels umsetzen. (vgl. BMU 2016: 21, 80)

Im Oktober 2018 gab das IPCC im Rahmen einer Studie bekannt, dass sich die Erde von der vorindustriellen Zeit bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung bereits um einen Grad erwärmt hat. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass die Jahre von 2014 bis 2018 die wärmsten seit Beginn der Messaufzeichnungen waren. Würden die nationalen Bestrebungen zur Emissionsreduktion, die vor Ratifizierung des Pariser Übereinkommens verfolgt wurden, konsequent umgesetzt werden, so betrüge die Erderwärmung bis zum Jahr 2100 dennoch 3,0 bis 3,2 Grad. Diese Erkenntnis unterstreicht die Wichtigkeit der im Pariser Übereinkommen vereinbarten Klimaziele, für deren Erreichung bereits ab 2020 ein rascher und umfassender Wandel von Gesellschaft und Wirtschaft vollzogen werden muss. Da die hauptsächliche Ursache für den weltweiten Temperaturanstieg der Eintrag von Treibhausgasen in die Atmosphäre infolge der Nutzung fossiler Energieträger ist, sind unter anderem drastische Veränderungen im Verkehrswesen erforderlich. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 5, 10f., 23)

2.2. Klimaschutz in der EU

Die EU konnte die Treibhausgasemissionen im Rahmen der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls reduzieren und ihre Klimaverpflichtungen infolgedessen einhalten (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 26). Um auch die Zielvorgaben für die zweite Verpflichtungsperiode zu erfüllen und darüber hinaus noch weitergehende Maßnahmen im europäischen Raum umzusetzen, entwarf die EU das Klima- und Energiepaket 2020 (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 27). Dieses Ende 2008 verabschiedete Maßnahmenbündel wurde für den Zeitraum von 2013 bis 2020 festgelegt und setzt sich im Wesentlichen aus drei Teilbeiträgen zusammen: Neben einer Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 Prozent ist sowohl eine Steigerung der Energieeffizienz um 20 Prozent als auch eine Erhöhung des Anteils

erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch auf 20 Prozent vorgesehen. Außerdem sind die Mitgliedstaaten dazu aufgefordert, den Anteil biogener Kraftstoffe im Verkehr auf zehn Prozent zu steigern. (vgl. WKO 2017: 54)

Die bis 2020 zu leistenden Teilbeiträge wurden im Zuge des nächsten Klima- und Energiepakets – auch unter Berücksichtigung der im Pariser Übereinkommen beschlossenen Zielvorgaben – bis 2030 verlängert. In diesem sind bezugnehmend auf das Referenzjahr 1990 neben einer Senkung der Treibhausgasemissionen um 40 Prozent sowohl eine Steigerung der Energieeffizienz um 32,5 Prozent als auch eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch auf 32 Prozent vorgesehen. Im Sinne einer besseren Koordinierung der EU-weiten Klima- und Energiepolitik sowie einer Sicherstellung der Zielerreichung müssen die Mitgliedstaaten eine regelmäßige Berichterstattung vornehmen. Grundlage für jene Fortschrittsevaluierung stellen die Nationalen Energie- und Klimapläne (NECPs – National Energy and Climate Plans) dar, in denen die Mitgliedstaaten ihre Beiträge und Maßnahmen festzulegen und bis Ende 2018 der Europäischen Kommission vorzuweisen hatten. (vgl. BMU 2020: 18)

Das Jahresende 2018 erwies sich auch für die nachfolgenden Jahrzehnte als initiale Phase eines weitreichenden Klimaschutzes: Zu diesem Zeitpunkt veröffentlichte die Europäische Kommission ein langfristiges Strategiekonzept, welches bis 2050 eine klimaneutrale Wirtschaft in der EU vorsieht und im Dezember 2019 die Zustimmung des Europäischen Rats erhielt. Der erste Schritt zur rechtlichen Umsetzung dieses sogenannten „European Green Deal“ erfolgte im Jänner 2020, als die Europäische Kommission ein EU-Klimaschutzgesetz vorstellte. Dieses verpflichtet die Mitgliedstaaten die gesetzten Klimaschutzziele bis 2050 zu verfolgen und zu diesem Zweck umfassende Maßnahmen für alle emissionsrelevanten Sektoren zu erarbeiten. Für den Verkehrssektor bedeutet dies eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 90 Prozent. (BMU 2020: 17)

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen unterliegt seit Periodenbeginn des Klima- und Energiepakets 2020 nicht mehr ausschließlich den nationalen Zielsetzungen, sondern ist EU-weit in zwei Systeme gegliedert: Auf der einen Seite ermöglicht die Emissionshandelsrichtlinie größeren Emittenten der Sektoren Industrie und Energieaufbringung den Handel mit Emissionszertifikaten. Demgegenüber steht die sogenannte Effort-Sharing Decision, welche alle Emissionsquellen außerhalb des Emissionshandels umfasst und jeden Mitgliedstaat zur Erreichung eines nationalen Reduktionsziels verpflichtet. Der Anteil des nationalen Beitrags richtet sich nach dem BIP pro Kopf des jeweiligen Mitgliedstaats, wobei sich jener Beitrag auf mehrere Sektoren – zu denen auch der Verkehr zählt – verteilt. Neben diesen beiden Systemen sind weiters die Richtlinie erneuerbare Energien sowie die Energieeffizienzrichtlinie von Bedeutung, die energiepolitische Zielsetzungen verfolgen. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 6, 31, 40)

2.3. Klimaschutz in Österreich

Anfang der 1990er Jahre wurde vom Umweltministerium im Sinne des österreichischen Klimaschutzes sowohl ein wissenschaftlich als auch administrativ aufgerichtetes Gremium ins Leben gerufen. Ersteres bezeichnete sich zunächst als „Nationale Kohlendioxid Kommission“,

wurde später jedoch in den Österreichischen Klimabeirat (ACCC – Austrian Council on Climate Change) umbenannt. Letzteres wurde 1991 als „Interministerielles Komitee zur Koordination von Maßnahmen zum Schutz des Weltklimas“ gegründet. In den Jahren 2002 und 2007 wurde die „Österreichische Klimastrategie 2010“ entwickelt, gefolgt von der im Jahr 2010 beschlossenen „Energiestrategie Österreich 2020“. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 41f.)

Die von der Europäischen Kommission initiierte Effort-Sharing Decision wurde in Österreich in Form des Klimaschutzgesetzes in nationales Recht umgewandelt. Im Zuge dessen wurden für jeden emissionsrelevanten Sektor Höchstmengen für die Periode des Klima- und Energiepakets 2020 festgelegt. Die dabei für Österreich vorgeschriebene Emissionsreduktion um 16 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 2005 ist in die Sektoren Energie und Industrie (außerhalb des Emissionshandels), Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft sowie Fluorierte Gase anteilmäßig aufgeteilt. Neben dem Klimaschutzgesetz sind für die Klima- und Energiepolitik Österreichs auch das Emissionszertifikatengesetz (abgeleitet aus der Emissionshandelsrichtlinie), die Richtlinie erneuerbare Energien sowie das Energieeffizienzgesetz (abgeleitet aus der Energieeffizienz-Richtlinie) von größerer Bedeutung. (vgl. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019a: 10-12)

2.4. Der österreichische Verkehrssektor

Als fünftes Jahr der zweiten Verpflichtungsperiode gemäß Kyoto-Protokoll sowie der Verpflichtungen der Effort-Sharing Decision weist das Jahr 2017 derzeit den aktuellsten Stand qualitätsgeprüfter Inventurdaten auf. Aus diesem Grund werden sich die sektoralen Emissionswerte, deren Höchstmengen für jedes Jahr der Periode 2013 bis 2020 im Klimaschutzgesetz vorgegeben sind, im Folgenden größtenteils auf jenes Jahr beziehen. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 56)

Von 2016 auf 2017 wurde in Österreich ein Anstieg der Treibhausgasemissionen – summiert über alle Sektoren – um 3,3 Prozent bzw. 2,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent verzeichnet. Somit erhöhte sich die Emissionsmenge im Jahr 2017 auf insgesamt 82,3 Mio. Tonnen, was im Vergleich zum Referenzjahr 1990 einer Zunahme um 4,6 Prozent bzw. 3,6 Mio. Tonnen entspricht. Hauptquelle dieses zusätzlichen Emissionseintrags in die Atmosphäre war unter anderem der Straßenverkehr, welcher insbesondere infolge der niedrigen Treibstoffpreise der vergangenen Jahre erneut angestiegen ist. Rechnet man im Zeitraum von 1990 bis 2017 den Emissionshandel hinzu, so wies der Verkehrssektor mit einem Plus von 71,8 Prozent bzw. 9,9 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent den stärksten Anstieg unter allen Sektoren auf (siehe Abb. 1). Die Substitution fossiler Energieträger durch Biokraftstoffe, welche 2017 mit einem Anteil von 6,1 Prozent das in der Kraftstoffverordnung festgelegte Substitutionsziel von 5,75 Prozent übertraf, wirkte sich positiv auf die Emissionsmengen des Verkehrssektors aus. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass jener Anteil bereits das zweite Jahr in Folge sinkt und der Herstellungsprozess von Biokraftstoffen sehr wohl Emissionen verursacht, die jedoch anderen Sektoren zugerechnet werden. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 56-58, 102, 106)

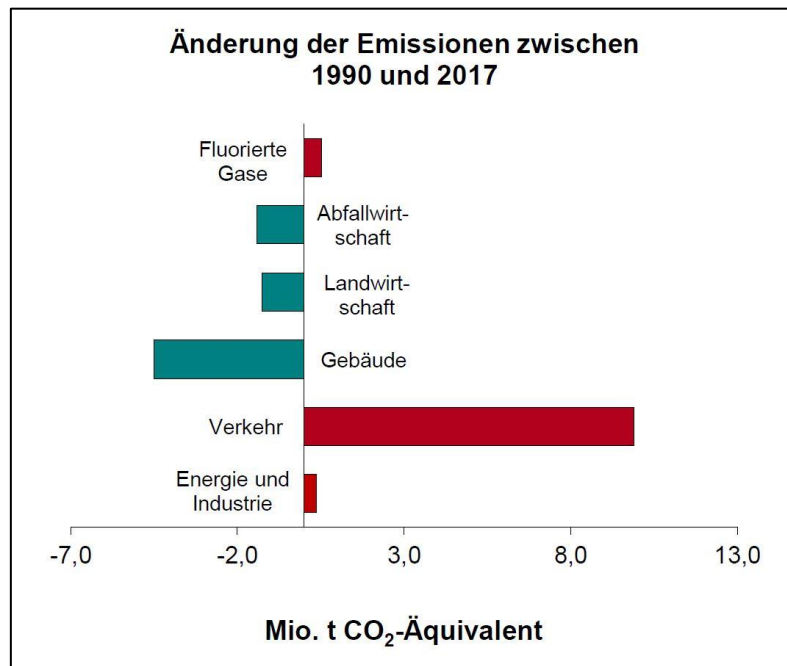


Abb. 1: Änderung der Emissionsmengen (inkl. Emissionshandel) zwischen 1990 und 2017 nach Sektoren in Österreich (Quelle: Umweltbundesamt GmbH 2019: 58)

Auch außerhalb des Emissionshandels erwies sich der Verkehrssektor mit einem Jahreszuwachs von 2,9 Prozent auf 23,7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent im Jahr 2017 als größter Verursacher von Treibhausgasemissionen in Österreich. Im Zeitraum von 1990 bis 2005 hielt er unter allen Sektoren wiederum den Rekord an höchsten Emissionszunahmen mit einem Plus von 79 Prozent. Zwar wurden in den Jahren von 2005 bis 2013 Reduktionen verzeichnet, doch ab 2014 stiegen die Emissionen wieder an und überschritten sowohl 2016 als auch 2017 die sektorale Höchstmenge laut Klimaschutzgesetz (siehe Abb. 2). (vgl. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019a: 22)

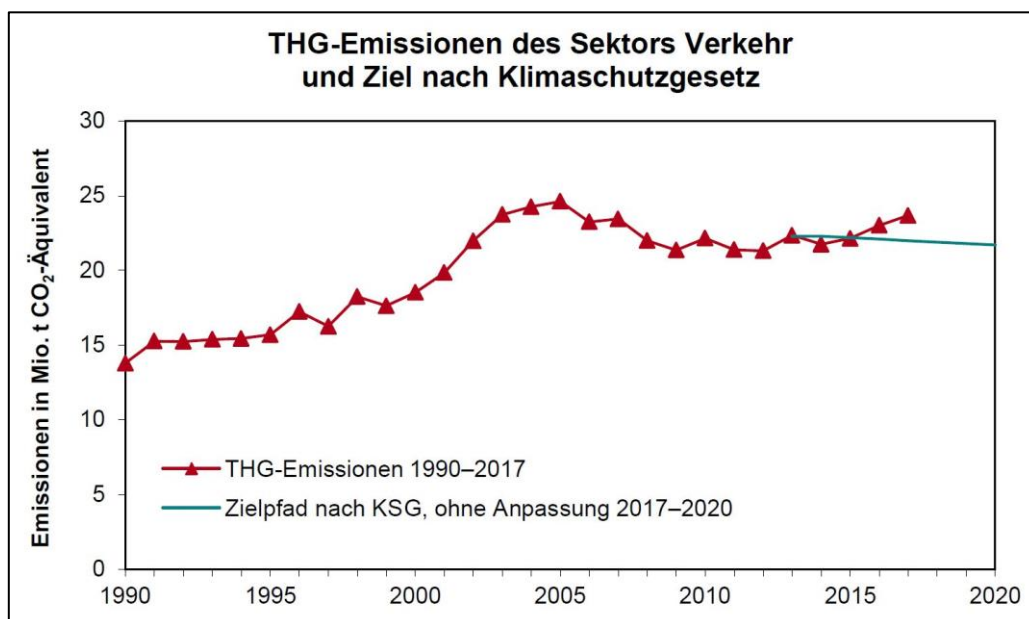


Abb. 2: Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors 1990 bis 2017 und Zielpfad gemäß Klimaschutzgesetz 2013 bis 2020 (Quelle: Umweltbundesamt GmbH 2019: 103)

Anhand einiger verkehrsbezogener Angaben wird deutlich, weshalb sich die Totalmenge an Verkehrsemissionen erhöht: 99 Prozent der im gesamten Verkehrssektor verursachten Treibhausgasemissionen sind dem Straßenverkehr zuzuordnen. Dabei beträgt der Anteil des PKW-Verkehrs mit 64 Prozent weit mehr als die Hälfte, wohingegen der Verkehr von Lastkraftwägen (LKW) die restlichen 36 Prozent umfasst. Dieses Verhältnis hat sich von 1990 bis 2017 stark zugunsten des PKW-Anteils verschoben, da dessen Emissionen im erwähnten Zeitraum um 58 Prozent gestiegen sind. Somit wird deutlich, welche entscheidende Rolle der PKW-Verkehr bei der Verursachung von Treibhausgasemissionen in Österreich spielt. Die Absatzsteigerungen von Treibstoff, welche auf die niedrigen Preise zurückzuführen sind, haben in den vergangenen Jahren das Wachstum der gesamten Fahrleistung im Inland (PKW- und Güterverkehr) begünstigt. Während Letztere von 2016 auf 2017 um etwa zwei Prozent gestiegen ist, hat sich der Besetzungsgrad pro Fahrzeug von 1,4 Personen im Jahr 1990 auf 1,1 Personen im Jahr 2017 verringert. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 103f., 109)

Abbildung 3 veranschaulicht die Verteilung und Entwicklung der im Personenverkehr getätigten Fahrleistung: Der emissionsintensive PKW-Anteil hatte zwischen 1990 und 2017 einen Zuwachs zu verzeichnen, dem eine Verringerung der Nutzung emissionsarmer Verkehrsarten (Bahn, Bus, Fuß- und Radverkehr) gegenübersteht. Lediglich der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) konnte in diesem Zeitraum eine geringfügige Steigerung erzielen. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 115f.)

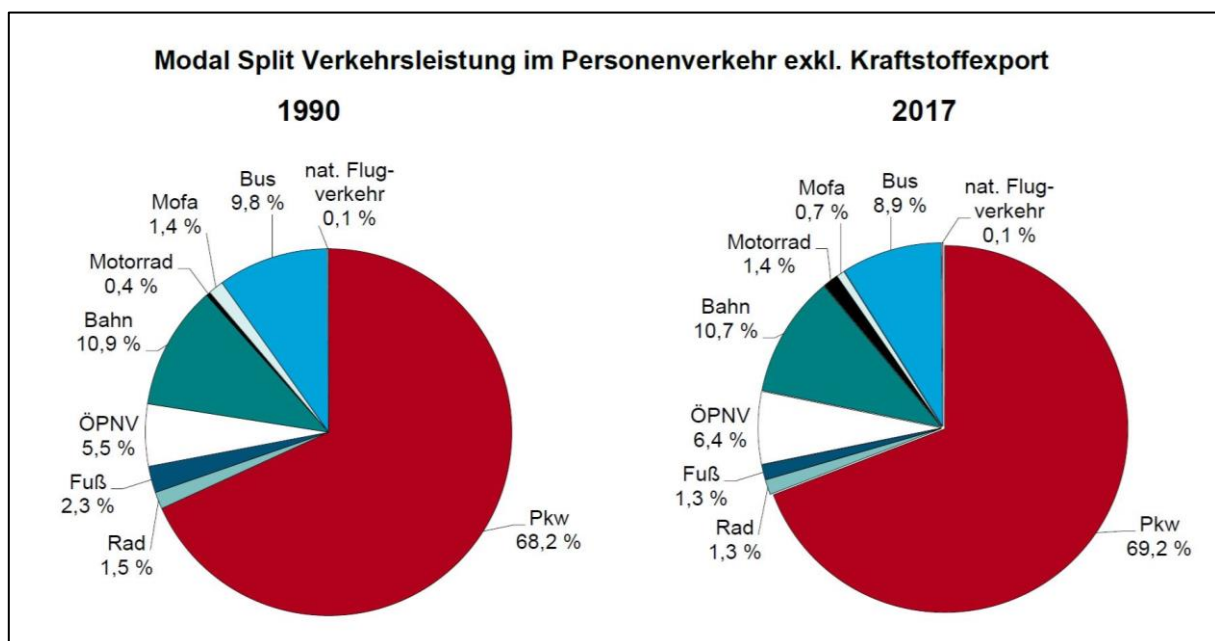


Abb. 3: Anteile der Verkehrsleistung im inländischen Personenverkehr 1990 und 2017 (ohne Kraftstoffexport und internationalem Flugverkehr) (Quelle: Umweltbundesamt GmbH 2019: 116)

Doch auch die fahrzeugbezogenen Angaben bestätigen den massiven Einfluss, den der PKW-Verkehr auf die Erzeugung von Treibhausgasemissionen in Österreich ausübt: Die jährlichen Neuzulassungen erreichten 2004 einen ersten Höchststand, gefolgt von einer geringfügigen Abnahme von 2005 bis 2008. Ab 2009 wurde erneut eine drastische Zunahme verzeichnet, die 2011 in der höchsten Anzahl seit Beginn des Monitorings gipfelte. Nachdem die darauffolgenden drei Jahre wiederum durch einen leichten Abwärtstrend charakterisiert waren, steigen die Neuzulassungen seit 2015 ungebrems an. Zusätzlich ist der Trend zu größeren und

leistungsstärkeren Fahrzeugen festzustellen, da die oberen Emissionsklassen relativ hohe Zulassungszahlen dazugewonnen haben. Damit einhergehend hat das durchschnittliche Gewicht seit dem Jahr 2000 sowohl bei benzin- als auch dieselbetriebenen Fahrzeugen zugenommen. Die durchschnittliche Motorleistung neu zugelassener Fahrzeuge ist ebenfalls durch einen kontinuierlichen Anstieg seit der Jahrtausendwende gekennzeichnet. Bei Betrachtung der mittleren CO₂-Emissionen neu zugelassener PKW stellt sich heraus, dass die österreichischen Werte seit 2005 durchgehend über jenen des EU-Durchschnitts liegen. Zwar ist seit mehreren Jahren generell – in Österreich und der EU – eine Abnahme der mittleren CO₂-Emissionen neu zugelassener PKW auszumachen, doch dieser positive Effekt kann alle zuvor genannten negativen Einflüsse auf die Entwicklung der Verkehrsemissionen nicht aufwiegen. (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019b: 19f., 23, 25, 36, 41)

Modellierte Treibhausgas-Szenarien bestätigen zweifellos, dass bei einer unveränderten Fortführung bestehender Klimaschutzmaßnahmen keine Chance besteht, die Reduktionsziele bis 2030 und 2050 zu erreichen. Es wird ausdrücklich auf die Umsetzung weiterer tiefgreifender Maßnahmen hingewiesen, welche ein Ende der Nutzung fossiler Energieträger sowie einen umfassenden Wandel von Gesellschaft und Wirtschaft nach sich ziehen. Dabei zählen eine Verringerung der Verkehrsleistung, eine Abkehr vom motorisierten Individualverkehr und ein nachhaltiges Mobilitätsmanagement zu den zentralen Vorkehrungen. Die Umstellung auf klimafreundliche Lebensstile sowie die Minderung konsumbasierter Emissionen können – insbesondere im Verkehrswesen – mithilfe von Politikinstrumenten vorangetrieben werden. Ein wirksames Instrument sind Umweltsteuern, bei denen Österreich im internationalen Vergleich ohnehin ein Defizit aufweist. All die erläuterten Umstände unterstreichen die Relevanz des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten GIS-Tools zur Berechnung einer netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 48f., 51f., 55)

3. Fiskalmaßnahmen zur Ökologisierung des Personenverkehrs

Durch die netzwerkbasierte Verkehrsemissionssteuer sollen nicht nur Push-Effekte im MIV ausgelöst, sondern zugleich Fördermittel für den ÖV generiert werden. Die Planung dieses Finanzflusses von der emissionsintensiven zur klimafreundlichen Mobilität erfordert eine Auseinandersetzung mit dem ökologischen Förder- und Steuersystem Österreichs, welches nachfolgend in Grundzügen beschrieben ist.

Im Subkapitel zur Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen lassen sich neben dem Mobilitätsmasterplan 2030 die Finanzierungen des ÖV, Fuß- und Radverkehrs sowie Fiskalmaßnahmen zur Ökologisierung des Straßenverkehrs nachlesen. Im anschließenden Subkapitel ist die Gegenüberstellung von österreichischen Umweltsteuern und jener im EU-Durchschnitt geschildert. Außerdem sind die Steuern im MIV angeführt, zu denen etwa die Normverbrauchsabgabe, motorbezogene Versicherungssteuer und Mineralölsteuer zählen.

3.1. Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen

Mit dem Mobilitätsmasterplan 2030 hat die österreichische Bundesregierung ein Maßnahmenbündel erarbeitet, welches den Luft-, Wasser-, Schienen- und Straßenverkehr langfristig sowohl ökonomisch als auch klimafreundlich ausrichten soll. Angefangen von effizienten Mobilitätsdienstleistungen bis hin zu umfassenden Infrastrukturmaßnahmen sollen dabei erhebliche Förder- und Investitionsmittel aufgewendet werden. Sowohl für den öffentlichen als auch den Individualverkehr sind auf ländlicher wie urbaner Ebene Strategieprogramme vorgesehen, welche zur Erfüllung der Klimaziele des Pariser Übereinkommens beitragen sollen. (vgl. Bundeskanzleramt Österreich 2020: 85f.)

Ein gutes Beispiel für die Abhängigkeit von staatlichen Finanzierungen ist der ÖV, welcher für den flächendeckenden Betrieb in Österreich eigenwirtschaftlich nicht tragfähig wäre. Durchschnittlich kann nur ungefähr ein Drittel der Kosten der Verkehrsdienste durch Ticketeinnahmen gedeckt werden, wobei letztere in städtischem Gebiet aufgrund der größeren Nachfrage höher ausfallen als im dünner besiedelten ländlichen Raum. Die Dienstleistungen des gesamten ÖV in Österreich werden mit jährlichen Kosten von rund 2,5 Milliarden Euro beziffert (vgl. Bundesanstalt für Bergbauernfragen 2015: 57). Die Differenz zwischen den Betriebskosten und den Fahrkartenerlösen setzt sich größtenteils aus Finanzierungen von Bundesministerien, Ländern und Gemeinden zusammen. Während im Jahr 2013 der Bund für den Betrieb des öffentlichen Personennah- und Regionalverkehrs in Summe über 1,2 Milliarden Euro bereitstellte, mussten Länder und Gemeinden in erster Linie den Busverkehr und ergänzende Leistungen im Personenregionalverkehr, deren Kosten nicht mehr vom Bund gedeckt wurden, finanzieren. (vgl. WIFO 2016: 214, 218f.)

Zukünftige Investitionen in den ÖV sollen sowohl im urbanen als auch ländlichen Raum ein weitgehend stündliches, ganztägiges Verkehrsangebot sicherstellen. Zu diesem Zweck werden u. a. die Schieneninfrastruktur ausgebaut, bestehende Streckenabschnitte verbessert, der Transportmitteleinsatz erhöht und Taktfahrpläne verdichtet. In diesem Zusammenhang ist auch die Umsetzung ausreichender Anschlüsse aller Ortskerne sowie die Modernisierung zahlreicher Bahnhöfe vorgesehen. Darüber hinaus soll das sogenannte 1-2-3-Klimaticket mit seinem

klimaschonenden, leistbaren und unkompliziert zugänglichen Konzept weiteren Anreiz zur Nutzung des ÖV schaffen. Auch der bundesweite Ausbau von Infrastrukturen für Park&Ride, Bike&Ride und Carsharing ist Ziel geplanter Investitionstätigkeiten. Schließlich sollen noch Energieeffizienzmaßnahmen für öffentliche Verkehrsmittel forciert, der Busverkehr dekarbonisiert, Fahrgastinformationssysteme verbessert, Privatbahnen gefördert und gemeinwohlorientierte Mobilitätsdienste, wie etwa Dorfbusse oder Anrufsammeltaxis, angeboten werden. (vgl. Bundeskanzleramt Österreich 2020: 85-87, 89)

Im Vergleich zu Investitionen in den ÖV müssen für Umsetzungen im Bereich des Fuß- und Radverkehrs nur geringe Mittel aufgewendet werden (vgl. WIFO 2016: 375). Zudem sind die Maßnahmen meistens schneller realisierbar und tragen ebenso zu Emissionseinsparungen im Verkehrssektor bei (vgl. WIFO 2016: 375). Doch in Anbetracht des aktuellen Ziels der Bundesregierung, den Radverkehrsanteil von derzeit sieben Prozent auf 13 Prozent bis zum Jahr 2025 zu erhöhen, werden auch hier budgetäre Belastungen entstehen. Geplant sind Bundesfinanzierungen für die Infrastruktur, das Routingsystem und bauliche Vorkehrungen für die Kombination von Radverkehr und ÖV. Darüber hinaus sollen insbesondere Radwege im ländlichen Raum attraktiver gestaltet und diverse Aktionsprogramme initiiert werden. Auch die Attraktivierung des Fußgängerverkehrs befindet sich auf der Agenda der Bundesregierung. (vgl. Bundeskanzleramt Österreich 2020: 92)

Die Förderstruktur im Sinne einer nachhaltigen Verkehrsstrategie ist jedoch nicht nur auf den Umweltverbund (u. a. ÖV, Fuß- und Radverkehr) ausgerichtet, sondern umfasst auch finanzielle Vorkehrungen zur Ökologisierung des Straßenverkehrs. Für Unternehmen müssen hierbei besondere Investitionsanreize geschaffen werden, da Maßnahmen zur Reduktion von Umweltbelastungen in vielen Fällen kostenintensiver ausfallen als konventionelle Lösungen. Mithilfe der Klimaschutzinitiative „klima:aktiv“ des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) werden seit 2004 in Kooperation mit der Österreichischen Energieagentur klimafreundliche Technologien und Dienstleistungen unterstützt. Das drei Jahre später initiierte Förderprogramm „klima:aktiv mobil“ ist speziell auf die Investitionen von Unternehmen und Gebietskörperschaften in ein nachhaltiges Verkehrswesen abgestimmt. Teil dieses Programms sind beispielsweise die Förderung von betrieblichem Mobilitätsmanagement, Fuhrparkumstellungen auf emissionsparende Fahrzeuge oder Spritspartrainings für LenkerInnen. (vgl. WKO 2017: 16f.)

Beim Straßenverkehr liegen insbesondere alternative Energieträger im Fokus politischer Klimastrategien: So soll nicht nur die Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge ausgebaut werden, sondern auch die Forschung und Entwicklung im Bereich der E-Mobilität sowie anderer klimaschonender Antriebstechnologien finanziert werden. Des Weiteren sind Förderungen für die private Anschaffung von E- und Wasserstoff-PKW vorgesehen. Für die Flottenumstellungen von konventionellen Bussen auf E- und Wasserstoff-Fahrzeuge seitens der Verkehrsbetriebe werden ebenso staatliche Fördermittel bereitgestellt. Dies gilt auch für die Ausstattung bedarfsorientierter Anbieter von Carsharing, Rufbussen, Taxis und Sammeltaxis mit emissionsfreien Fahrzeugen. (vgl. Bundeskanzleramt Österreich 2020: 89, 93f.)

Aus den jährlichen Kosten des Umweltverbundes sowie den zukünftig geplanten Investitionen des Bundes in klimafreundliche Mobilitätsformen geht hervor, welche entscheidende Rolle steuerliche Einnahmen spielen. Aus Rentabilitätsgründen wurde das Streckennetz der ÖBB seit den 1970er Jahren kontinuierlich verkleinert, wovon insbesondere Nebenstrecken in dünner

besiedelten Gebieten betroffen waren. Die Substitution jener Nebenbahnen durch kostengünstigeren Busverkehr erfolgte allerdings nur teilweise. Um dem Rückbau öffentlicher Verkehrsdienste sowie dem damit einhergehenden Zuwachs der PKW-Nutzung entgegenzuwirken, ist eine Ausgleichsfinanzierung von Seiten des emissionsintensiven MIV unerlässlich. (vgl. Bundesanstalt für Bergbauernfragen 2015: 62)

3.2. Umweltsteuern im Verkehrssektor

3.2.1. Allgemeines

Für die Verlagerung des Verkehrs von emissionsintensiven auf klimaschonende Transportarten sind wesentlich mehr bzw. effizientere Steuerungsmechanismen als bisher vonnöten. Dies betrifft u. a. fiskalische Maßnahmen und dabei insbesondere die Umweltsteuern, welche in Österreich im europäischen Vergleich nicht nur bescheidener ausfallen, sondern – wie auch im EU-Durchschnitt – seit 2002 sogar anteilmäßig zurückgehen (siehe Abb. 4). Beispielsweise fällt die preisbereinigte Besteuerung des Energieverbrauchs in Österreich geringer aus als im EU-weiten Mittel und die Besteuerung fossiler Energieträger ist seit Jahren einer inflationsbedingt realen Abnahme unterworfen. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 51)

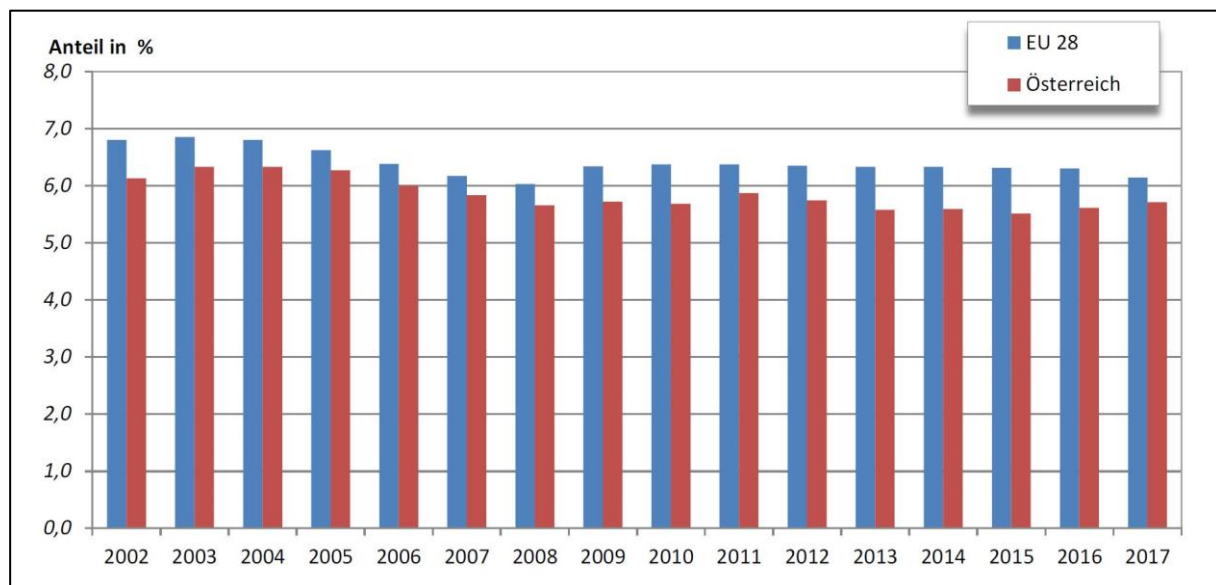


Abb. 4: Anteil der Umweltsteuern am gesamten Aufkommen an Steuern und Sozialabgaben in Prozent, Vergleich Österreich und EU-28, 2002 bis 2017 (Quelle: Statistik Austria 2019: 26)

Aus diesem Grund empfehlen internationale Organisationen wie etwa die OECD eine verstärkte Ökologisierung des österreichischen Steuersystems. Um sozialökonomische Negativeffekte zu verringern bzw. vermeiden, sind Kompensationsmechanismen für benachteiligte Gruppen unabdingbar. Dieses entscheidende Kriterium wurde vom praktischen Teil der vorliegenden Arbeit genauer untersucht, indem die räumliche Lage des Wohnsitzes der steuerpflichtigen Person – neben deren physischer Eingeschränktheit – zur Ermittlung der Verkehrsemissionssteuer herangezogen wurde. (vgl. Umweltbundesamt GmbH 2019: 51)

In diesem Kontext stellt sich die Frage, wie umweltrelevante Steuern und Abgaben überhaupt zu charakterisieren sind. Eine Umweltsteuer kann nur als solche bezeichnet werden, wenn sie

einen Einfluss auf Kosten oder Preise jener Produkte bzw. ihrer abgeleiteten Größen hat, welche nachweislich negative Umwelteffekte ausüben. Dabei ist irrelevant, ob mit der Steuer tatsächlich die Verringerung ökologischer Schäden beabsichtigt wird oder ob sie lediglich fiskalischen Zwecken dienen soll. Darüber hinaus lassen sich umweltrelevante Steuern und Abgaben gemäß Eurostat grundsätzlich in vier Kategorien unterscheiden (siehe Abb. 5): Abgaben auf die Energieproduktion und Energieprodukte inklusive erneuerbaren Energieträgern, CO₂- oder anderen Treibhausgasemissionen fallen in die Kategorie „Energie“. Abgaben auf den Erwerb, den Besitz sowie die Nutzung von Fahrzeugen entsprechen der Kategorie „Transport“. Andere Verkehrsmittel wie etwa Züge oder Schiffe, Transportdienstleistungen sowie transportspezifische Versicherungen sind hier ebenso inkludiert. Abgaben auf Emissionen in das Wasser oder die Luft, aber auch Abfallmanagement und Lärm gehören der Kategorie „Umweltverschmutzung“ an. Schließlich umfasst die Kategorie „Ressourcen“ jene Abgaben, welche die Nutzung natürlicher Ressourcen als Bemessungsgrundlage haben, wobei Grund und Boden davon ausgenommen sind. Für TeilnehmerInnen des MIV sind unmittelbar die beiden Kategorien „Transport“ und „Energie“ ausschlaggebend, da fahrzeugbezogene Abgaben bei ersterer enthalten sind und die Mineralölsteuer als treibstoffbezogene Abgabe letzterer Kategorie zugerechnet wird. (vgl. BMLFUW 2016: 8f.)

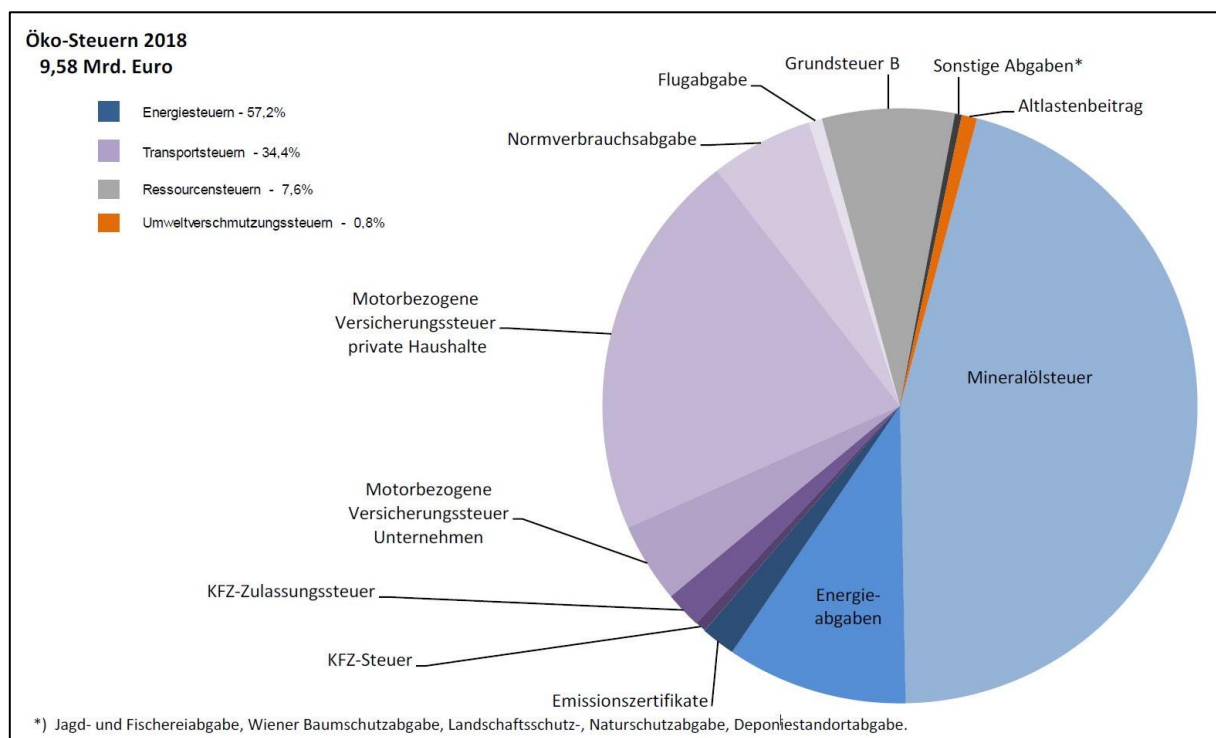


Abb. 5: Anteilsmäßige Aufsplittung der Umweltsteuern, 2018 (Quelle: Statistik Austria 2019: 10)

In Abbildung 5 werden die Kategorien sowie die relative Verteilung der Umweltsteuern in Österreich im Jahr 2018 veranschaulicht. Die Energiesteuern umfassten mit 57,2 Prozent mehr als die Hälfte der gesamten Umweltsteuern, wobei die Mineralölsteuer den Großteil ausmachte und somit generell das meiste Gewicht unter allen Abgaben aufwies. An zweiter Stelle lag mit 34,4 Prozent die Kategorie der Transportsteuern, wohingegen die Ressourcensteuern und die Umweltverschmutzungssteuern mit 7,6 Prozent bzw. 0,8 Prozent durch relativ geringe Anteile gekennzeichnet waren. (vgl. Statistik Austria 2019: 10)

3.2.2. Steuern im MIV

Die Besteuerung von Fahrzeugen kann je nach konkretem Anknüpfungspunkt und intendierter Anreizwirkung auf mehrere Weisen erfolgen: Der Erwerb eines Fahrzeugs ist in der Regel mit einer einmaligen Steuerleistung verbunden, welche der Normverbrauchsabgabe (NoVA) entspricht. Der Besitz eines Fahrzeugs äußert sich in einer regelmäßig wiederkehrenden Besteuerung wie die motorbezogene Versicherungssteuer. Schließlich wird in Österreich auch die Nutzung eines Fahrzeugs besteuert, wobei hier die Mineralölsteuer (MÖSt) die bedeutendste fahrleistungsabhängige Abgabe darstellt. Da für den MIV privater Haushalte unmittelbar nur jene drei erwähnten Steuern von Bedeutung sind, werden diese im Folgenden genauer erläutert. (vgl. CCCA 2018: 1)

Die NoVA fällt bei der erstmaligen Zulassung eines Fahrzeugs an, sofern sie nicht bereits bei dessen Kauf entrichtet wurde. In der Regel obliegt die Steuerpflicht daher dem Letztverbraucher, wobei die Nutzung als Betriebs- oder Privatfahrzeug keinen Einfluss auf den Steuersatz ausübt. Sowohl Krafträder als auch PKW und andere Kraftfahrzeuge, die hauptsächlich der Personenbeförderung dienen, sind von der NoVA betroffen. Es gibt mehrere begünstigte Fahrzeuge, die von dieser Steuer befreit sind, wie etwa elektrische oder elektrohydraulische Kraftfahrzeuge. (vgl. WKO 2020: 19f.)

Die NoVA wurde bereits einer Reihe an Anpassungen im Sinne des Klimaschutzes unterzogen. Hierbei waren für den Privatgebrauch hauptsächlich folgende beiden Änderungen maßgeblich: Im Jahr 2008 wurde das Normverbrauchsabgabengesetz derart angepasst, dass Fahrzeuge mit niedrigen Werten an Schadstoffemissionen (unter 120 g/km) sowie alternativen Antrieben (Hybridantrieb, E85-Superethanol, Erdgas- bzw. Biogasantrieb, Wasserstoff oder Flüssiggas) steuerlich begünstigt wurden, wohingegen Fahrzeuge mit hohem Ausstoß an Schadstoffemissionen (über 150 g/km) sowie Diesel-PKW ohne Partikelfilter einer Steuererhöhung unterlagen. Des Weiteren bewirkte das Abgabenänderungsgesetz 2014 eine Reform der NoVA-Bemessungsgrundlage. Dabei wurde zur Berechnung des Steuersatzes der Normverbrauch in Litern/100 km durch den CO₂-Emissionswert des Fahrzeugs in g/km ersetzt. Die Motorleistung elektrischer Antriebe wird seitdem im Rahmen der NoVA nicht mehr versteuert. (vgl. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019b: 8)

Die motorbezogene Versicherungssteuer kommt bei Kraftfahrzeugen mit einem höchst zulässigen Gesamtgewicht von weniger als 3,5 Tonnen zur Geltung. Auch hier werden Klimaschutzaspekte berücksichtigt, da elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge gänzlich von der Steuer befreit sind. Im Falle von Hybridantrieben unterliegt nur der Leistungsbeitrag des Verbrennungsmotors der Steuerpflicht. Hingegen ist für PKW mit Fremdzündungsmotor sowie Kombifahrzeuge, deren inländische Erstzulassung vor 1987 erfolgte, ein Zuschlag von 20 Prozent vorgeschrieben – sofern die festgelegten Abgasgrenzwerte überschritten werden. (vgl. WKO 2017: 9f.)

Für den praktischen Teil der vorliegenden Arbeit ist der durchschnittliche monatliche Betrag der motorbezogenen Versicherungssteuer in Österreich von Bedeutung. Für dessen Ermittlung ist zunächst die Angabe der durchschnittlichen Leistung der Verbrennungsmotoren erforderlich: Diese betrug im Jahr 2018 für neu zugelassene Benzinfahrzeuge etwa 87 kW, für neu zugelassene Dieselfahrzeuge etwa 108 kW und im Mittel aller Neuzulassungen etwa 96 kW (vgl. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2019b: 40). Bezugnehmend auf

die Berechnungsmethode des Zeitraums 01.03.2014 bis 30.09.2020 – in welchen das Jahr 2018 hineinfällt – wird die motorbezogene Versicherungssteuer gemäß WKO (2020: 24) wie folgt berechnet:

- für die ersten 24 Kilowatt der eingetragenen Leistung je Kilowatt: € 0
- für die weiteren 66 Kilowatt der eingetragenen Leistung je Kilowatt: € 0,62
- für die weiteren 20 Kilowatt der eingetragenen Leistung je Kilowatt: € 0,66
- für die darüber hinausgehenden Kilowatt der eingetragenen Leistung je Kilowatt: € 0,75

Daraus ergibt sich für den Leistungsdurchschnitt im Jahr 2018 folgende Rechnung:

$$\begin{aligned}96 \text{ kW} - 24 \text{ kW} &= 72 \text{ kW} \\66 \text{ kW} \times € 0,62 &= € 40,92 \\(72 \text{ kW} - 66 \text{ kW}) \times € 0,66 &= € 3,96 \\€ 40,92 + € 3,96 &= \underline{€ 44,88}\end{aligned}$$

Somit wurden in Österreich im Jahr 2018 für die motorbezogene Versicherungssteuer pro Monat durchschnittlich 44,88 Euro bezahlt.

Die Mineralölsteuer ist von allen Umweltsteuern Österreichs die aufkommensstärkste Abgabe und für den Staatshaushalt die ergiebigste steuerliche Einnahmequelle aus dem Verkehrssektor. Gegenstand dieser verbrauchsabhängigen Steuer sind Kraft- und Heizstoffe aus Mineralölen, zu denen auch die fossilen Energieträger Diesel und Benzin zählen. Eine allfällige Anhebung der MÖSt gilt als wenig wünschenswert, da sonst einerseits der lukrative Tanktourismus einbrechen sowie andererseits der Treibstoffexport für den LKW-Verkehr schrumpfen würde (vgl. WKO 2019: 13). Da die MÖSt pro Liter Diesel niedriger ausfällt als für einen Liter Benzin, wird die Verwendung des ersteren Treibstoffes samt damit einhergehendem hohem Schädigungspotenzial für Mensch und Atmosphäre begünstigt. Generell wird davon ausgegangen, dass sich diese Steuer nur minimal für die Ökologisierung des Verkehrssektors eignet. (vgl. WIFO 2016: 196)

4. Soziale Determinanten der Autoabhängigkeit

Im Einleitungsteil wurde erwähnt, dass die Besteuerung des MIV auf eine sozial verträgliche und gerechte Weise erfolgen soll. Der Fokus der Untersuchungen liegt zwar aufgrund des GIS-Schwerpunktes auf den räumlichen Komponenten, aber die sozialen Einflussfaktoren sollen zumindest ansatzweise zur Geltung kommen, um diesbezüglich erste Denkanstöße für eine eventuelle Weiterentwicklung der Thematik zu bieten.

In den nachfolgenden Subkapiteln sind im Wesentlichen drei Bevölkerungsgruppen dargelegt, welche laut facheinschlägiger Literatur direkt oder indirekt mit Einschränkungen der Mobilität verbunden sind. Dabei handelt es sich um Kinder, ältere Menschen sowie Personen mit körperlicher Behinderung.

4.1. Kinder

Kinder beeinflussen das Mobilitätsverhalten eines Haushalts signifikant, weil mit ihnen die täglichen Wegeketten in der Regel komplexer sind (vgl. BMVBS 2011: 23). Dabei wurde eine besonders hohe Komplexität in Zusammenhang mit Kindern im Volksschulalter festgestellt (vgl. BMVBS 2011: 23). Doch generell lässt sich sagen, dass Kinder unter 14 Jahren hinsichtlich ihrer Mobilität mehr auf die elterliche Fürsorge angewiesen sind, da sie in diesem Aspekt noch keine vollständige Selbständigkeit erlangt haben. Neben diesem Umstand tragen mehrere weitere Faktoren dazu bei, dass in Familien mit Kindern der Besitz eines Autos stärker verbreitet ist als in anderen Bevölkerungsgruppen. Auch die Anzahl der Kinder spielt eine wesentliche Rolle für das Mobilitätsverhalten von Haushalten: Während sich übliche Erledigungen mit nur einem Kind je nach Wohnlage noch zu Fuß oder mit dem Fahrrad bewerkstelligen lassen, steigt die Autoabhängigkeit ab zwei Kindern drastisch. Allerdings ist in Bezug auf die Autonutzung nicht nur die Bewältigung größerer Entfernungen bzw. die Zeitersparnis von Bedeutung, sondern auch das elterliche Sicherheitsgefühl bzw. die bessere Kontrolle über das Kind. Hinzu kommt, dass die Transporte größerer Einkäufe mit Kindern generell meist schwerer zu tätigen sind. (vgl. HEINE und MAUTZ 2000: 19, 27, 34)

Umfragen zufolge gilt die Nutzung des ÖV mit Kleinkindern und Kinderwägen tendenziell als unbeliebt (vgl. HEINE und MAUTZ 2000: 33). Einen weiteren nicht zu vernachlässigenden Faktor stellen technische und soziale Infrastrukturen im ländlichen Raum dar. Beispielsweise kann die zunehmende Schließung von Schulen und Kindergärten für viele Wohnorte zu längeren Schulwegen und somit zur höheren Autoabhängigkeit der Eltern führen (vgl. NEU und NIKOLIC 2015: 185, 190). Als positiv im Mobilitätsverhalten ist jedoch hervorzuheben, dass die täglich zurückgelegten Entfernungen in Kindesalter geringer ausfallen als bei älteren Personen: Während die tägliche Wegestrecke bei 18- bis 50-Jährigen im Durchschnitt 53 km pro Tag beträgt, sinkt jener Wert bei Kindern in weiterführenden Schulen auf 30 km pro Tag. Von Personen der jüngsten Altersgruppen werden hingegen täglich nur 24 km zurückgelegt. (vgl. LIMBOURG 2015: 78)

4.2. Ältere Menschen

Die Altersgruppen über 60 Jahre weisen in Bezug auf den nichtmotorisierten Individualverkehr (NMIV) die geringste Fortbewegungsgeschwindigkeit auf, weshalb sie grundsätzlich einer verschlechterten Erreichbarkeitsqualität unterliegen (vgl. UNGER 2015: 91). Außerdem nehmen sowohl der Führerscheinbesitz als auch die Verfügbarkeit eines PKW mit höherem Alter ab, da die verminderte Konzentrations- und Reaktionsfähigkeit eine selbständige Beteiligung am MIV erheblich begrenzen (vgl. PFAFFENBICHLER und TOTH 2014: 103). Doch trotz dieser Mobilitätseinschränkungen ist die Einkaufshäufigkeit unter älteren Personen erstaunlich hoch, denn sogar Hochbetagte über 75 Jahre gehen kaum seltener einkaufen als junge Menschen (vgl. BMVBS 2011: 34).

Die Mobilität älterer Personen ist nicht nur durch eine Abnahme der täglich zurückgelegten Entfernungen gekennzeichnet, sondern auch durch ein verändertes Verhalten charakterisiert: Die Aufenthaltsdauer im Verkehr verlagert sich im höheren Alter hin zu langsameren Verkehrsarten wie das Zufußgehen, wohingegen sich die durchschnittliche Dauer des Autofahrens als LenkerIn bei über 74-Jährigen signifikant reduziert. Als PKW-MitfahrerInnen nehmen ältere Menschen allerdings mehr als jüngere Altersgruppen am Straßenverkehr teil. Wie bei Familien mit Schulkindern wirken sich große Distanzen im ländlichen Raum auch drastisch auf das Mobilitätsverhalten älterer Menschen aus. Obwohl das Unfallrisiko für Betagte und Hochbetagte mit PKW erhöht ist, sind infolge mangelnder Transportalternativen viele von ihnen auf das Autofahren angewiesen. Insbesondere ältere Frauen fühlen sich laut Untersuchungen in Bezug auf ihre Mobilität am Land deutlich eingeschränkter als in städtischen Gebieten. (vgl. LIMBOURG 2015: 77-79)

4.3. Personen mit körperlicher Behinderung

Im Jahr 2017 waren 7 Prozent der deutschen Bevölkerung von Mobilitätseinschränkungen, die mit körperlicher Behinderung einhergehen, betroffen. Dabei war auffällig, dass jene Beeinträchtigungen ab einem Alter von 50 erheblich zunahmen. Solche Personen mit körperlich bedingten Einschränkungen ihrer Mobilität leiden vor allem jenseits von städtischen Zentren unter mangelhaften bzw. schlechten Erreichbarkeitsverhältnissen (vgl. UNGER 2015: 105). Dies trifft in besonderem Maße auf jene behinderten Personen zu, die entweder allein oder mit anderen physisch eingeschränkten Personen in einem Haushalt leben (vgl. BMVBS 2012: 9). Lebt jedoch zumindest eine gesunde Person in einem Behindertenhaushalt, so kann in der Regel von etwas geringeren Teilhabeproblemen ausgegangen werden (vgl. BMVBS 2012: 9). Als Hauptgrund dafür erweisen sich Mitfahrgelegenheiten im PKW. Insbesondere für Sehbehinderte stellt die Nutzung eines Autos als MitfahrerInnen das wichtigste Verkehrsmittel dar, was in diesem Kontext auf eine erhöhte PKW-Abhängigkeit in diesen Haushalten hindeutet. (vgl. NOBIS und KUHNIMHOF 2018: 6, 102)

5. Erreichbarkeit und GIS-Netzwerkanalyse

Dieses Kapitel umfasst die Hauptthemen und somit den größten Teil der theoretischen Abhandlung. Die Messung der fußläufigen Erreichbarkeit von Haltestellen des ÖV und verschiedenen Einrichtungen der Daseinsvorsorge bildete einen essenziellen Bestandteil der praktischen Ausarbeitung. Darauf aufbauend wurden umfassende Netzwerkanalysen in einem Geoinformationssystem (GIS) vorgenommen, um die monatliche Verkehrsemissionssteuer in kleinräumiger Differenzierung zu ermitteln.

Um diese empirischen Abläufe mit entsprechender Literatur zu stützen, behandelt das erste Subkapitel sowohl die Definition und Ausprägungen der Erreichbarkeit als auch Konzepte zur Bildung messbarer Indikatoren. Danach sind die Grundlagen der Graphentheorie sowie die Simulation einer Kürzester-Weg-Berechnung anhand des Dijkstra-Algorithmus beschrieben. Letzterer veranschaulicht auf vereinfachte Weise das Prinzip computergesteuerter Netzwerkanalysen, welche das Kernstück der empirischen Untersuchungen darstellen. Im letzten Subkapitel können noch diverse Formen bzw. Werkzeuge der GIS-Netzwerkanalyse nachgelesen werden. Dazu zählen das Netzwerkdatenmodell, die Ermittlung der optimalen Route, das Vehicle-Routing-Problem, die Suche des nächstgelegenen Standortes, die Einzugsgebietsanalyse, die Start-Ziel-Kostenmatrix sowie die Location-Allocation-Analyse. Hierbei ist weiters anzumerken, dass sich die genannten Tools durchgehend auf die GIS-Software „ArcGIS Pro“ des Entwicklers ESRI Inc. beziehen, weil auch der praktische Teil der vorliegenden Arbeit dort durchgeführt wurde.

5.1. Definition und Ausprägungen der Erreichbarkeit

Ganz allgemein lässt sich der Begriff „Erreichbarkeit“ als die räumliche Zugänglichkeit von Einrichtungen und Dienstleistungen definieren, wobei zum Erreichen eines Ortes Mobilität benötigt wird. Sowohl Anzahl als auch räumliche Verteilung konkreter Ausgangs- und Zielpunkte bilden wesentliche Maßzahlen der Erreichbarkeit. Doch auch die Beschaffenheit des zugrundeliegenden Netzwerks samt Raumüberwindung sowie den damit einhergehenden Impedanzen spielen eine wichtige Rolle, was insbesondere in der Graphentheorie und bei GIS-Netzwerkanalysen zur Geltung kommt. Impedanzen sind Widerstände, die sich in Form von Kosten – zum Beispiel als Fahrzeit oder Höhenmeter – signifikant auf die Erreichbarkeit auswirken. Während sich die genannten Parameter auf die sogenannte „ortsbasierte“ Erreichbarkeit beziehen, umfasst die „individuelle“ Erreichbarkeit sozialwissenschaftliche Aspekte wie etwa persönliche Situationen, Bedürfnisse und Möglichkeiten. (vgl. KARRAIS 2014: 57f.)

Die Messung von Erreichbarkeit basiert auf der Differenzierung und Einbeziehung diverser Ausprägungen bzw. Dimensionen, aus denen mittels Operationalisierung mehrere Indikatoren abgeleitet werden können (vgl. BBSR 2019: 21). Tabelle 1 vermittelt einen Überblick über jene Dimensionen, welche vom deutschen Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2001: 9) aufgelistet und erläutert wurden.

Dimension	Erläuterung
Quellen	Erreichbarkeitsindikatoren können aus Sicht unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen wie sozialer oder Altersgruppen berechnet werden, aus Sicht unterschiedlicher Personengruppen wie Geschäftsreisende oder Touristen oder aus Sicht unterschiedlicher wirtschaftlicher Akteure wie Branchen oder Unternehmer.
Ziele	Erreichbarkeitsindikatoren können die Lage eines Gebiets im Raum in Bezug auf Gelegenheiten, Aktivitäten und Ressourcen wie Bevölkerung, Wirtschaft, Universitäten oder touristische Sehenswürdigkeiten messen. Die Ziele können auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden, nur Ziele über einer bestimmten Größe, alle Ziele proportional zu ihrer Größe oder stärkere Gewichtung der größeren Ziele, um Agglomerationseffekte auszudrücken.
Raum- überwindungs- widerstand	Der Raumüberwindungswiderstand kann als Funktion eines oder mehrerer Merkmale der Verkehrsverbindungen zwischen den Gebieten ausgedrückt werden. Mögliche Merkmale sind Entfernung (Luftlinie oder über Verkehrsnetze), Reisezeit, Transportkosten, Bequemlichkeit, Zuverlässigkeit oder Sicherheit. Der Raumüberwindungswiderstand kann auf unterschiedliche Weise in die Berechnung eingehen: als mittlerer Raumüberwindungswiderstand aller Ziele, als Obergrenze (entferntere Ziele werden überhaupt nicht berücksichtigt) oder nichtlinear (entferntere Ziele werden geringer berücksichtigt).
Restriktionen	Die Nutzung von Verkehrsverbindungen kann durch Vorschriften wie Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrverbote für bestimmte Fahrzeuggrößen oder Fahrzeitobergrenzen sowie durch Kapazitätsbeschränkungen durch Steigungen, Gefälle Strecken oder Verkehrsstaus eingeschränkt werden.
Barrieren	Zusätzlich zum Raumüberwindungswiderstand können nichträumliche, z.B. politische, wirtschaftliche, rechtliche, kulturelle oder sprachliche Barrieren zwischen Gebieten berücksichtigt werden, umgekehrt auch spezielle nicht räumliche Beziehungen zwischen Gebieten wie z.B. eine komplementäre Wirtschaftsstruktur.
Verkehrsarten	Es ist möglich, entweder nur den Personenverkehr, nur den Güterverkehr oder beide Verkehrsarten zu betrachten.
Verkehrsmittel	Erreichbarkeitsindikatoren können für die Straße, die Schiene, die Binnenwasserstraßen oder den Luftverkehr berechnet werden. Multimodale Erreichbarkeitsindikatoren verknüpfen Erreichbarkeitsindikatoren verschiedener Verkehrsmittel. Intermodale Erreichbarkeitsindikatoren berücksichtigen Reisen mit mehr als einem Verkehrsmittel.
Räumlicher Maßstab	Die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren im europäischen, transnationalen oder regionalen Maßstab erfordert Daten in unterschiedlicher räumlicher Auflösung sowohl in Bezug auf die Gebietsgröße als auch hinsichtlich der Darstellung der Verkehrsnetze, des Zugangs von den Regionen zu den Verkehrsnetzen und der Warte- und Umsteigezeiten innerhalb von Verkehrsknoten.
Gerechtigkeit	Anhand von Erreichbarkeitsindikatoren können Räume identifiziert werden, in denen Ungleichgewichte in der Erreichbarkeit vorliegen, beispielsweise zwischen reichen und armen, zentralen und peripheren, städtischen und ländlichen oder zwischen nahe an Verkehrsknoten oder fern von Verkehrsknoten gelegenen Gebieten.
Dynamik	Erreichbarkeitsindikatoren können für unterschiedliche Zeitpunkte berechnet werden, um Veränderungen in der Erreichbarkeit durch Verkehrsinfrastrukturinvestitionen, andere verkehrspolitische Maßnahmen oder durch Veränderungen bei den Zielsystemen und deren Einfluss auf Verringerung oder Vergrößerung der Unterschiede in Erreichbarkeit aufzuzeigen.

Tab. 1: Dimensionen der Erreichbarkeit (Quelle: BBR 2001: 9; eigene Darstellung, 2020)

Einen weiteren Ansatz für die Bildung von messbaren Indikatoren bietet BBSR (2019: 22f.) mittels Zerlegung der Eigenschaft „Erreichbarkeit“ in vier Komponenten:

- Die räumliche Komponente berücksichtigt alle raum- bzw. ortsbezogenen Gegebenheiten, welche sich ihrerseits wiederum in drei Gruppen gliedern lassen. Während die erste Gruppe die Menge, Qualität und räumliche Verteilung von Gelegenheiten – etwa Arbeitsplätze oder Einrichtungen der Daseinsvorsorge – umfasst, bezieht sich die zweite Gruppe auf deren Nachfrage an den Ausgangsorten. Die dritte Gruppe stellt das Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage dar, woraus sich ein Wettbewerb um Aktivitäten mit begrenzten Kapazitäten ergibt.
- Die verkehrliche Komponente berücksichtigt das Verkehrssystem, deren Nutzung an ein bestimmtes Verkehrsmittel bzw. eine bestimmte Verkehrsart gebunden ist und welches Widerstände zur Bewältigung der Entfernung ausübt. Die Raumüberwindung fordert zeitlichen, monetären und sonstigen Aufwand, der für die Reise vom Quell- zum Zielort erbracht werden muss und vom Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage abhängig ist.
- Die zeitliche Komponente umfasst zeitliche Restriktionen aller Art wie etwa individuelle Zeitbudgets, Intervalle im Verkehrssystem oder die Verfügbarkeit von Gelegenheiten zu verschiedenen Tageszeiten.
- Schließlich kommen im Rahmen der individuellen Komponente sämtliche individuelle Gegebenheiten zur Geltung. Auf der einen Seite wird das verkehrsteilnehmende Individuum von Bedürfnissen angetrieben, die vom Alter, Einkommen, Ausbildungsniveau und anderen Faktoren abhängig sind. Auf der anderen Seite werden diese Bedürfnisse von den Möglichkeiten und Fähigkeiten begrenzt, die der reisenden Person in ihrer jeweiligen Lebenssituation gegeben sind.

5.2. Graphentheorie

5.2.1. Mathematische und begriffliche Grundlagen

Die Graphentheorie hat als mathematisches Modell der Wirklichkeit im Laufe der letzten Jahrzehnte enorm an Bedeutung gewonnen. Verantwortlich für ihren vermehrten Einsatz in zahlreichen Themenbereichen ist die Entwicklung computergestützter Rechenmethoden. So ist es nicht verwunderlich, dass sich Berechnungen und Analysen geographischer Netze, in denen Graphen eine elementare Rolle spielen, als zentrales Anwendungsfeld der Geoinformatik etabliert haben (vgl. WINTER 2019: 189). Zur Lösung komplexer Probleme, wie etwa das Routing in Verkehrsnetzen sowie deren Planung und Optimierung, ist der Einsatz von IT-Systemen unabdingbar. Auch für die Geoverarbeitungswerkzeuge zur GIS-Netzwerkanalyse in der vorliegenden Arbeit bildet die Graphentheorie eine mathematische Grundlage. (vgl. HAFTENDORN 2010: 57, 63)

Um zu verstehen, wie Netzberechnungen im Wesentlichen funktionieren, müssen einige Begriffe und Regeln aus der Graphentheorie verinnerlicht werden: Ein Graph ist ein Geflecht aus Knoten (v , *vertices*) und Kanten (e , *edges*), wobei erstere durch eine Punktgeometrie charakterisiert sind und einzelne Objekte repräsentieren können. Zwischen ihnen bilden die Kanten linienhafte Verbindungen (siehe Abb. 6). Dabei ist zu beachten, dass einerseits die beiden Enden einer Kante nicht zwingendermaßen in verschiedene Knoten münden müssen und

andererseits ein Knoten beliebig viele Kanten aufweisen kann (vgl. BÜSING 2010: 2). Da Graphen in der Regel zeichnerisch dargestellt werden, sind sie meistens durch eine zweidimensionale Struktur gekennzeichnet. (vgl. WINTER 2019: 189)

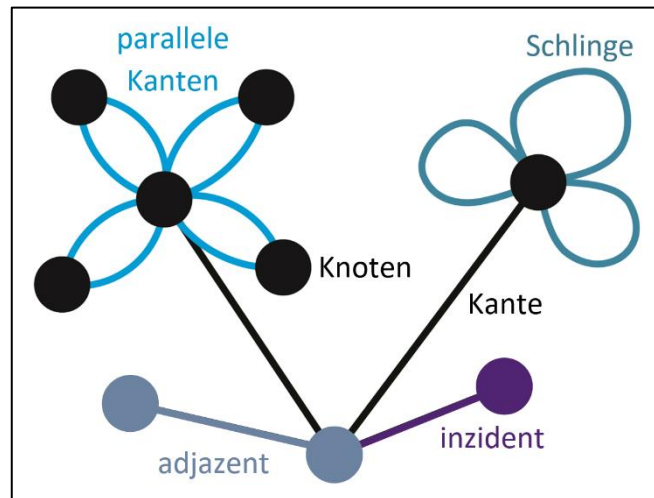


Abb. 6: Begriffliche Grundlagen eines Graphen (Quelle: BÜSING 2010: 2; veränderte Darstellung, 2020)

Sind die beiden Endknoten einer Kante identisch, so handelt es sich um eine Schlinge (siehe Abb. 6). Von parallelen Kanten spricht man hingegen, wenn sie dieselben Endknoten aufweisen und daher alternative Wege zwischen zwei Knoten existieren (siehe Abb. 6). Enthält ein Graph weder Schlingen noch parallele Kanten, wird er als einfacher Graph bezeichnet. Relevant ist immer nur die topologische Charakteristik des Graphen – nicht jedoch Position und Aussehen der Knoten und Kanten. Folglich spielt es aus mathematisch-logischer Perspektive keine Rolle, wie weit die Knoten voneinander entfernt liegen oder ob die Kanten geradlinig, geschwungen, eckig oder überkreuzt verlaufen, solange die Lagebeziehungen bzw. Verbindungen zwischen den Objekten aufrecht bleiben. Als adjazent bzw. benachbart gelten daher zwei Knoten, welche über eine Kante direkt miteinander verbunden sind (siehe Abb. 6). Diese Begrifflichkeit gilt ebenso für zwei Kanten, die einen gemeinsamen Knoten aufweisen. Als inzident wird hingegen jener Umstand bezeichnet, wenn ein Knoten der Endknoten einer Kante ist (siehe Abb. 6). Außerdem ist anzumerken, dass der Grad eines Knotens der Anzahl seines Auftretens als Endknoten einer Kante entspricht. In einfachen Graphen lässt sich daher der Grad eines Knotens direkt von der Anzahl seiner Nachbarn ableiten. (vgl. BÜSING 2010: 2-5)

Weiters sind nachfolgende Begriffe – insbesondere im Kontext von Verkehrsnetzwerken – von größerer Bedeutung (vgl. LYPP 2015: 12): Sind alle Knoten und Kanten eines Graphen auch in einem anderen Graphen enthalten, so handelt es sich bei ersterem um einen Teilgraphen. Bei einem gerichteten Graphen weisen die Kanten eine Orientierung auf. Dies bedeutet, dass man entlang einer Kante nur von einem bestimmten Endknoten zum anderen, aber nicht in die umgekehrte Richtung gelangen kann. Ein typisches Beispiel hierfür in einem Verkehrsnetz stellt die Einbahnstraße dar. Eine Folge von Knoten und Kanten wird im Allgemeinen als Kantenzug bezeichnet. Ist dort jede Kante nur einmal vorhanden, so spricht man im Speziellen von einem Weg. Dieser wiederum wird als einfach bezeichnet, wenn auch kein Knoten mehr als einmal vorkommt. Ein Weg mit identischem Anfangs- und Endknoten stellt einen Kreis dar. Sind Bereiche eines Graphen lediglich über eine einzige Kante miteinander verbunden, dann bildet diese eine sogenannte Brücke. Letztere kann durchaus eine entscheidende Rolle spielen,

sobald sie Teil eines Kantenzugs wird. Denn sollte die Brücke – etwa als Leitungsabschnitt eines Stromnetzes oder als Straße eines Verkehrsnetzes – ausfallen, dann bieten sich keine alternativen Kanten an, um den Kantenzug von einem zum anderen Bereich des Graphen wiederherzustellen. (vgl. BÜSING 2010: 8f., 12f., 125)

5.2.2. Bedeutende Erkenntnisse

Die erste überlieferte Überlegung zur heutigen Graphentheorie geht auf das 18. Jahrhundert zurück und basiert auf einem Verkehrsnetz. Als sich Leonhard Euler, einer der bedeutendsten Mathematiker, in der ostpreußischen Stadt Königsberg aufhielt, beschäftigte er sich mit folgender Problemstellung: Die städtische Landmasse ist aufgrund von Verzweigungen des Flusses Pregel in vier Teile gegliedert, welche über insgesamt sieben Brücken miteinander verbunden sind. Euler stellte sich die Frage, ob es möglich sei, durch Königsberg zu spazieren und dabei jede der sieben Brücken nur ein einziges Mal zu überqueren. Um diese Überlegung besser zu veranschaulichen, stellte er die vier Stadtteile mittels Punkte (Knoten) und die Brücken anhand von Linien (Kanten) dar (siehe Abb. 7). Seine zu entdeckende Route entsprach somit dem heutigen Konzept des Weges, welches im vorhergehenden Absatz erläutert wurde. Schnell war er sich darüber im Klaren, dass nicht die genaue Position der Punkte, sondern lediglich ihre linienhaften Verbindungen eine Rolle spielen. (vgl. HAFTENDORN 2010: 58)

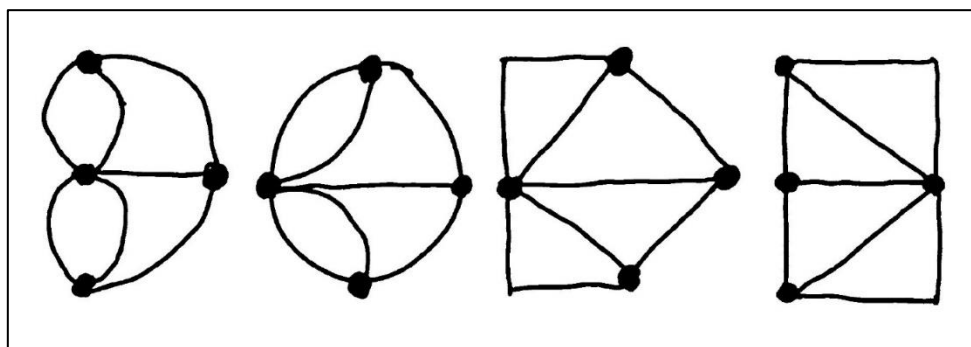


Abb. 7: Graphen zum Königsberger Brückenbeispiel von Leonhard Euler (Quelle: HAFTENDORN 2010: 58)

Alle in Abbildung 7 dargestellten Graphen haben gemeinsam, dass sie jeweils aus vier Knoten und sieben Kanten bestehen. Besonders relevant ist der Grad der Knoten, da dieser darüber entscheidet, wie vielen alternativen Wegen man im Graphen folgen kann und ob es überhaupt einen zulässigen Weg gibt, der alle Kanten (ein einziges Mal) einschließt. Diese spezielle Variante eines Kantenzugs nennt man auch Eulerscher Weg. (vgl. HAFTENDORN 2010: 59)

Im Königsberger Brückenbeispiel gibt es drei Knoten des dritten Grades sowie einen des fünften Grades. Da es sich hierbei also ausschließlich um ungerade Grade handelt, kann es aus folgendem Grund keinen Eulerschen Weg geben: Startet man an einem Knoten, so kann dieser Weg dort nicht mehr enden, da bereits alle inzidenten Kanten durchlaufen wurden. Genauso gilt umgekehrt, dass der Weg an einem Knoten nicht mehr enden kann, wenn der Kantenzug dort gestartet wurde. Daraus ergibt sich die unmögliche Konstellation, dass der Königsberger Graph mehr als einen Start- bzw. Endknoten haben müsste, um einen Eulerschen Weg zuzulassen. (vgl. HAFTENDORN 2010: 59)

Laut LYPP (2015: 12) wurde eine weitere Erkenntnis zur Graphentheorie, die insbesondere im Zusammenhang mit Verkehrsnetzen von Bedeutung ist, vom Mathematiker Claude Berge in den 1960er Jahren gewonnen. Dieser beschäftigte sich u. a. mit der Frage, wie man die Anzahl der Kreise in einem Graphen berechnen kann. Darüber gibt nachfolgende Formel Aufschluss, wobei e der Anzahl der Kanten, v jener der Knoten, p jener der Teilgraphen und μ letztlich der Anzahl der Kreise entspricht:

$$\mu = e - (v - p) = e - v + p$$

Der Ausdruck $(v - p)$ kann im Falle von Verkehrsnetzen mit $(v - 1)$ gleichgesetzt werden, da letztere selten voneinander getrennt sind und deshalb aus lediglich einem (Teil-)Graphen bestehen. Subtrahiert man nun die verbleibende Anzahl der Knoten $(v - 1)$ von jener der Kanten e , so erhält man die Anzahl der Kreise. Würde es sich beim Graphen um einen sogenannten Baum handeln, dessen Kanten wie die Äste eines Baumes verzweigt sind, müsste $(v - 1)$ exakt e entsprechen und somit einen kreisfreien Graphen ergeben (vgl. BÜSING 2010: 14). Wenn der Graph jedoch mehr Kanten als $(v - 1)$ enthält, dann besitzen demnach einige Knoten zusätzliche Kantenverbindungen, die wiederum für die Bildung der Kreise verantwortlich sind. (vgl. LYPP 2015: 12)

5.2.3. Kürzeste Wege

Die Ermittlung des kürzesten Weges bildet einen zentralen Bestandteil bzw. die Grundlage diverser Graphenberechnungen. Alltägliche Anwendungsbereiche im Verkehrswesen finden sich beispielsweise im Routing durch ein öffentliches Verkehrssystem oder in der Navigation des Individualverkehrs durch ein Straßennetz. Voraussetzung für eine Kürzeste-Wege-Berechnung ist das Vorhandensein eines zusammenhängenden und gewichteten Graphen, dessen Kanten aufgrund bestimmter Wertezuweisungen eine Gewichtung aufweisen – etwa die Längenangabe in Meter oder die Fahrzeit in Minuten. Somit können aus graphentheoretischer Perspektive auch schnellste Verbindungen oder beliebige andere quantifizierbare Werte einen kürzesten Weg darstellen. (vgl. HAFTENDORN 2010: 68)

Edsger Dijkstra formulierte 1957 einen Algorithmus, welcher die mathematische Grundlage zahlreicher computerbasierter Netzberechnungen bildet. Das Prinzip funktioniert so, dass alle benachbarten Knoten eines Startpunktes entsprechend ihrer Kantengewichtung zu letzterem bewertet werden. Anschließend verlagert sich der Startpunkt zum benachbarten Knoten mit dem niedrigsten Wert, von wo die neue Nachbarschaftsbewertung mit kumulierten Werten erneut beginnt. Setzt man diese Analyse solange fort bis kein Knoten mehr übrigbleibt, dann lässt sich am Ende der kürzeste Weg bzw. dessen Verästelung – auch Kürzeste-Wege-Baum genannt – feststellen. Im Folgenden soll die Vorgehensweise anhand der schrittweisen Darstellung eines vereinfachten gewichteten Graphen veranschaulicht werden. (vgl. HAFTENDORN 2010: 69-73)

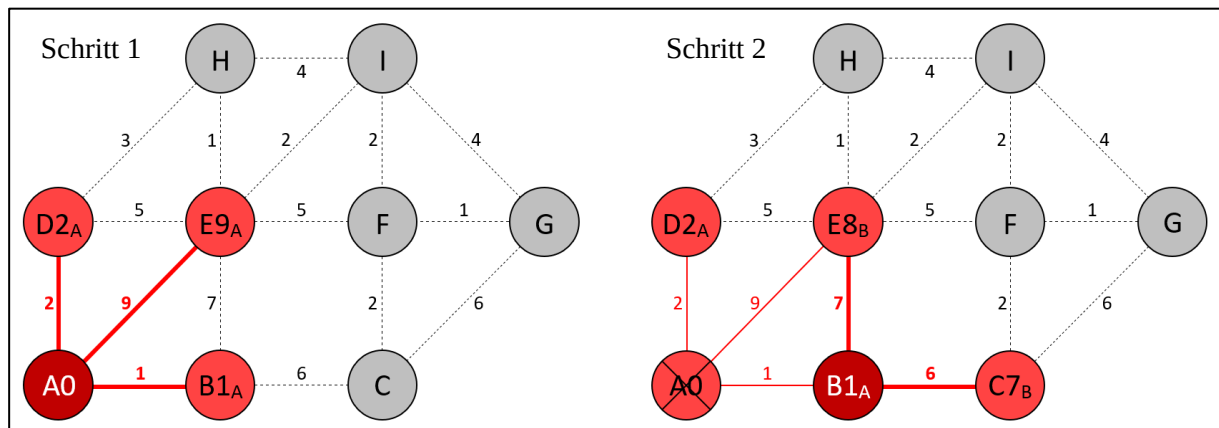


Abb. 8: Schritte 1 und 2 des Dijkstra-Algorithmus (Datengrundlage: HAFTENDORN 2010: 70; eigene Darstellung, 2020)

Schritte 1 und 2 (siehe Abb. 8): Ausgehend vom Startpunkt A0 werden alle Kanten zu den benachbarten Knoten B, D und E markiert. Diese erhalten den Wert ihrer mit dem Startpunkt verbundenen Kante sowie die Angabe, dass Knoten A der Ausgangspunkt war. Letzterer trägt von Beginn an den Wert 0, da es keinen benachbarten Knoten mehr gibt, welcher seinen Kantenwert auf A übertragen könnte – denn gemäß der graphentheoretischen Definition eines Weges darf keine Kante mehrmals benutzt werden. In der rechten Abbildungshälfte (Schritt 2) ist ersichtlich, wie Knoten A0 seine Funktion als Ausgangspunkt an Knoten B1A weitergibt. Ersterer wird durchgestrichen, da er diese Funktion nicht nochmals ausüben kann, und mit Letzterem beginnt die neue Bewertungsrunde. Die Wahl des neuen Ausgangspunktes fällt nicht auf D2A oder E9A, weil B1A den niedrigsten Wert aufweist. Die beiden Kanten zu den benachbarten Knoten C und E werden markiert und übertragen dort ihren mit B1A summierten Wert. Da sich für Knoten E nun der Wert 8 (1 zwischen A und B plus 7 zwischen B und E) ergibt und dieser geringer als der vorhergehende Wert (9) des Knotens E ausfällt, wird der höhere durch den geringeren Wert ersetzt. Auf umgekehrte Weise dürfen Werte eines Knotens jedoch nicht ausgetauscht werden. Des Weiteren wird an den zwei neuen Knoten C und E festgehalten, dass ihr letzter Ausgangspunkt B war. Somit werden jene beiden Knoten zu C7B bzw. E8B und Schritt 2 ist beendet. (vgl. HAFTENDORN 2010: 70f.)

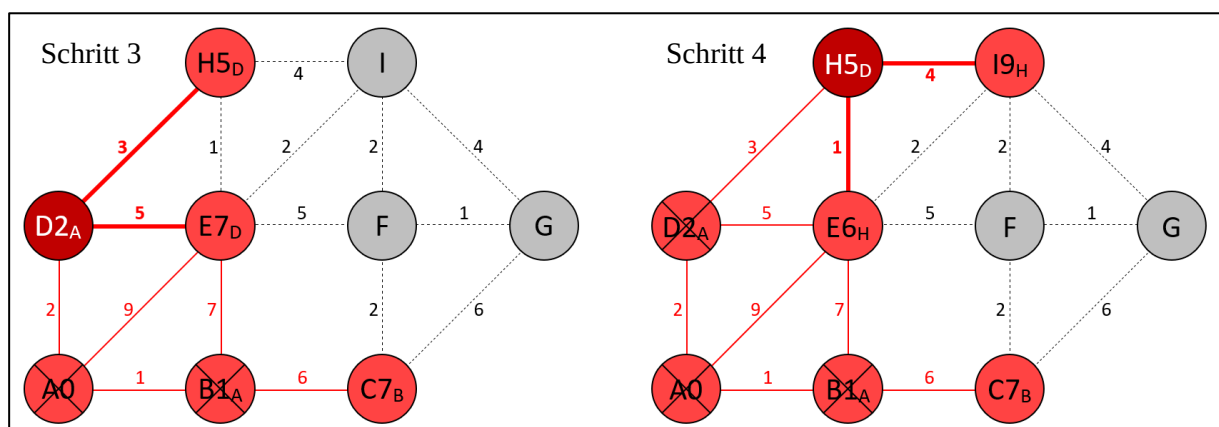


Abb. 9: Schritte 3 und 4 des Dijkstra-Algorithmus (Datengrundlage: HAFTENDORN 2010: 71; eigene Darstellung, 2020)

Schritte 3 und 4 (siehe Abb. 9): Der Knoten B1A gilt absofort als abgeschlossen und wird daher durchgestrichen. Erneut fällt die Wahl des neuen Ausgangspunktes auf jenen Knoten mit der

niedrigsten Bewertung, was im Fall der linken Abbildungshälfte (Schritt 3) dem Punkt D2_A entspricht. Von dort aus erfolgt die Bewertung und Beschriftung der benachbarten Knoten nach demselben Schema wie zuvor. Da sich infolge der neuen Aufsummierung aller Kantenwerte für den Knoten E wieder ein geringerer Wert gebildet hat, ersetzt dieser nun den ehemaligen höheren Wert. In der rechten Abbildungshälfte (Schritt 4) ist ersichtlich, wie diesmal ausgehend von H5_D die nächste Bewertungsrunde einsetzt, während Knoten D2_A inaktiv wird. Wiederum reduziert sich der Wert für Knoten E. (vgl. HAFTENDORN 2010: 71)

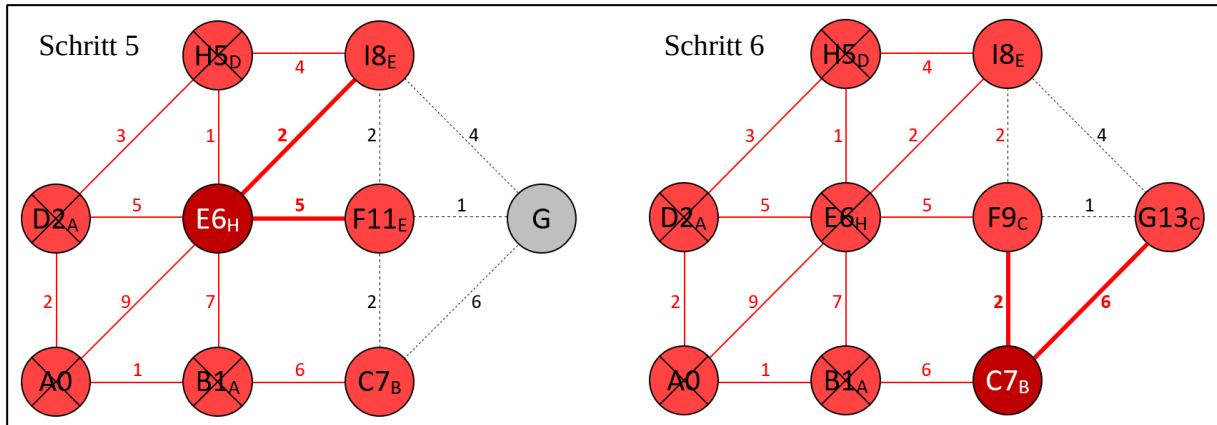


Abb. 10: Schritte 5 und 6 des Dijkstra-Algorithmus (Datengrundlage: HAFTENDORN 2010: 71; eigene Darstellung, 2020)

Schritte 5 und 6 (siehe Abb. 10): Auch diese beiden Schritte verlaufen nach demselben Schema wie alle vorhergehenden. Allerdings ist diesmal besonders, dass in der linken Abbildungshälfte (Schritt 5) Knoten E, dessen Wert bisher kontinuierlich reduziert wurde, den neuen Ausgangspunkt bildet. Dieser Wert (6) wird ab jetzt bis zum Ende des Algorithmus unverändert bleiben, da es keinen benachbarten Knoten mehr gibt, welcher seinen Wert samt Kantenbewertung auf Knoten E übertragen könnte. Des Weiteren ist in der rechten Abbildungshälfte (Schritt 6) festzustellen, dass nun auch dem letzten unberührten Knoten des Graphen, nämlich G, ein Wert zugewiesen wurde. (vgl. HAFTENDORN 2010: 71)

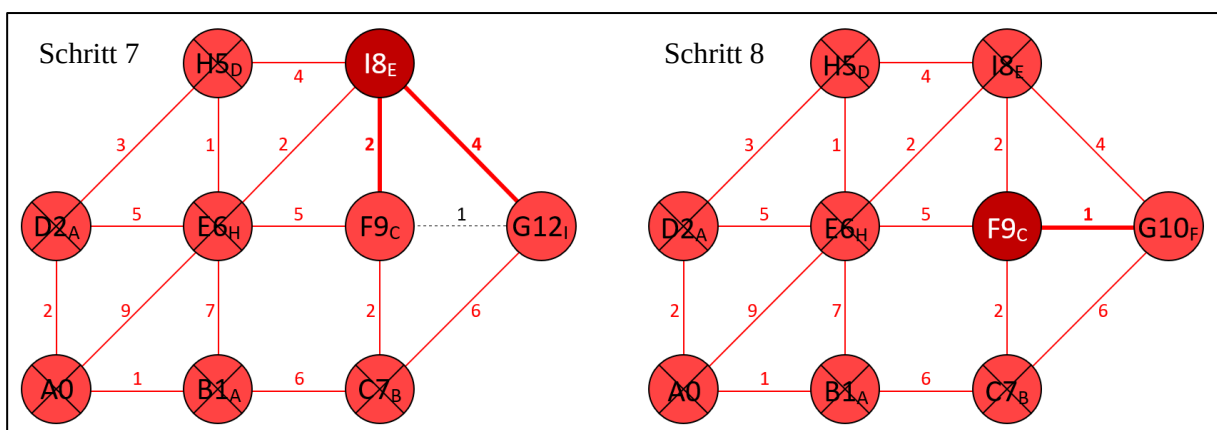


Abb. 11: Schritte 7 und 8 des Dijkstra-Algorithmus (Datengrundlage: HAFTENDORN 2010: 72; eigene Darstellung, 2020)

Schritte 7 und 8 (siehe Abb. 11): Im Zuge dieser letzten beiden Schritte wird der Dijkstra-Algorithmus abgeschlossen. Wie in der rechten Abbildungshälfte (Schritt 8) ersichtlich ist, enden alle Berechnungen sobald auch die letzte Kante ihren Wert einem Knoten übertragen hat.

Betrachtet man nun am Ende den Graphen, so lässt sich der Kürzeste-Wege-Baum erkennen, indem man beginnend mit Startpunkt A in alphabetischer Reihenfolge den Knotenbeschriftungen folgt. In diesem Fall ergeben sich somit zwei „Äste“ bzw. kürzeste Wege (A-D-H-E-I und A-B-C-F-G) durch das Netzwerk. (vgl. HAFTENDORN 2010: 72)

Neben der Ermittlung der optimalen Strecke wird dank dieser Vorgehensweise sichergestellt, dass keine Kreiswege vorkommen können. Darüber hinaus bleibt keine Stelle unberücksichtigt, da bei zusammenhängenden Graphen jede Kante analysiert und infolgedessen auch jeder Knoten zumindest entweder als Ausgangs- oder Übertragungspunkt der Bewertungsrunden integriert wird. Nach diesem Prinzip berechnen beispielsweise Routenplaner und Navigationsgeräte die effizienteste Route durch ein Verkehrsnetz. Natürlich muss vorher festgelegt werden, auf welche Kantengewichtung sich der Algorithmus beziehen soll. Wie man aus dem Alltag weiß, können etwa die Ermittlung der kürzesten Fahrzeit und jene der kürzesten Strecke völlig unterschiedliche Routen zur Folge haben. Außerdem ergibt sich durch die Änderung des Startpunktes auch ein anderer Baum. (vgl. HAFTENDORN 2010: 72f.)

5.3. GIS-Netzwerkanalyse

5.3.1. Das Netzwerkdatenmodell

Netzwerke basieren auf einer Menge von Knoten und Kanten, die miteinander nach bestimmten Prinzipien zu Graphen verknüpft sind, welche bereits in den vorangegangenen Kapiteln grundlegend erklärt wurden. Allerdings wäre eine einfache Knoten-Kanten-Knoten-Struktur für GIS-Netzwerkanalysen unzureichend, da bei der Wegfindung je nach Anwendungsfall konkrete Regeln zu berücksichtigen sind. Die Fließrichtung in Gewässernetzen, Kantenübergänge bei Brücken oder Abbiegeverbote an Straßenkreuzungen sind nur wenige Beispiele für Regelsysteme in Netzwerken. Darüber hinaus weisen die Kanten in vielen Netzwerken differenzierte Widerstandswerte auf, die signifikante Einflüsse auf die Wegfindung ausüben können. So werden etwa Straßenabschnitte mit starkem Gefälle von Schwertransportern vermieden und Routen, die über viele Ampelanlagen mit langen Rotphasen führen, werden im Navigationssystem eines Lieferservices tendenziell ausgeschlossen. Deshalb müssen auch alle Gesetzmäßigkeiten als Ergänzung zur physischen Netzstruktur modelliert werden, um Problemstellungen möglichst realitätsgetreu in einem GIS analysieren und auswerten zu können. Das Produkt dieser vorbereitenden Modellierung nennt man Netzwerkdatenmodell. (vgl. DE LANGE 2013: 413f.)

Auch die Extension „Network Analyst“ von ArcGIS Pro – jenem GIS, welches für die praktische Ausarbeitung der Masterarbeit herangezogen wurde – bietet die Modellierung von Netzwerkdaten an. Hierbei handelt es sich um die Erstellung eines sogenannten Network Dataset, in welchem alle Verbindungen und Benutzungsregeln des zugrundeliegenden Netzwerks festgelegt sind. Beispielsweise kann bei der Transformation eines Netzwerks aus Straßen und Wegen in ein Network Dataset überprüft werden, ob alle zugehörigen Elemente topologisch korrekt miteinander verbunden sind. Diese Elemente lassen sich – gemäß der Graphentheorie (siehe Kap. „5.2. Graphentheorie“) – in Knoten und Kanten, aber auch in Kantenübergänge unterteilen. Während die Kanten als Verbindungslinien zwischen den punktuellen Knoten dienen, steuern Kantenübergänge die Richtungen bzw. Bewegungsabläufe

von einer Kante zur nächsten, was den möglichen Abbiegerelationen an Kreuzungsknoten entspricht. Darunter fallen beispielsweise die beiden Kantenübergänge „links abbiegen“ oder „geradeaus fahren“ am Ende eines Straßensegments (siehe Abb. 12). Des Weiteren wird im Network Dataset eingestellt, welche Gesetzmäßigkeiten (im Falle eines Verkehrssystems etwa Einbahnsysteme, Wendeverbote, Fahrzeugbeschränkungen für bestimmte Straßentypen etc.) für die Analysen in Netzwerk geltend sein sollen. (vgl. XIAOTANG 2009: 15)

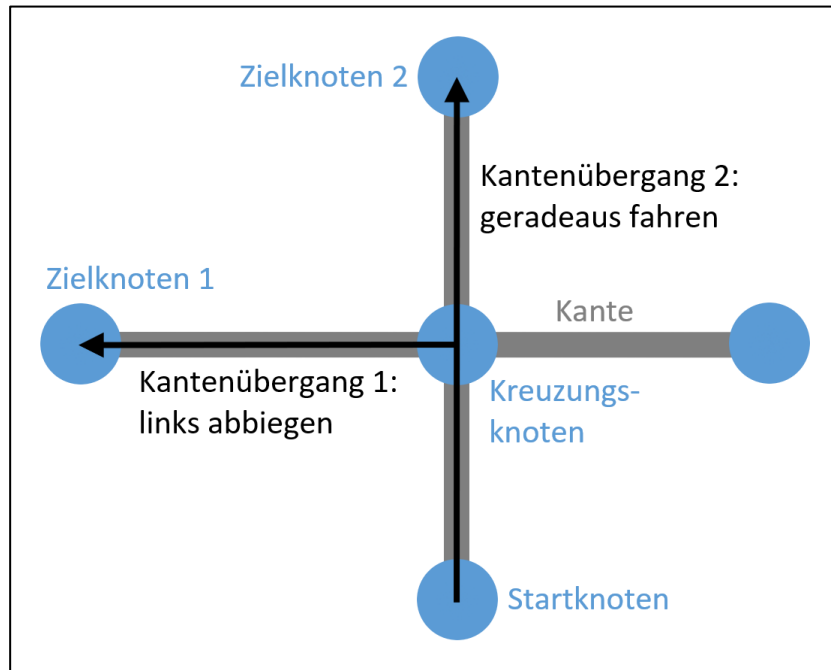


Abb. 12: Zwei mögliche Kantenübergänge an einem Kreuzungsknoten (eigene Darstellung, 2021)

Die topologische Korrektheit kann mittels sogenannter Konnektivitätsgruppen sichergestellt werden. Je nachdem, welcher Gruppe die Features des Netzwerks angehören, werden im Zuge der Analysen entsprechende Verbindungsschemata beachtet, wobei auch die Zuordnung eines Features zu mehreren Gruppen zulässig ist. Auf diese Weise können vertikale Lageverhältnisse im Straßenverkehr berücksichtigt werden. Befinden sich zum Beispiel zwei Straßennetze auf zwei unterschiedlichen Höhenniveaus, so bilden ihre Kreuzungen im Falle von Brücken oder Tunnels keinen gemeinsamen Anknüpfungspunkt. Dies bedeutet, dass die Features der beiden Straßennetze separaten Konnektivitätsgruppen zuzurechnen sind und erst dadurch eine topologische Korrektheit aufweisen. Ist jedoch etwa bei einer Brücke eine Treppe vorhanden, welche die zwei Höhenniveaus für FußgängerInnen zugänglich macht, dann muss dieses Verbindungsfeature Mitglied beider Gruppen sein. Zu diesem Zweck lassen sich vereinfacht zwei Konnektivitätsregeln festlegen: Bei der Endpunkt-Konnektivität dienen nur die Endpunkte eines Liniensegments als Anknüpfungspunkte zu weiteren Segmenten. Diese Regel hat zur Folge, dass sich überkreuzende Kanten (wie im Falle von Über- oder Unterführungen im Straßensystem) keine topologische Verknüpfung aufweisen und deshalb im Zuge einer Analyse am Kreuzungspunkt kein Abbiegen von der oberen zur unteren Kante oder umgekehrt gestattet ist. Hingegen wird bei der Konnektivitätsregel „Beliebiger Stützpunkt“ eingestellt, dass sich überkreuzende Kanten auch tatsächlich topologisch kreuzen und somit am Kreuzungspunkt ein Wechsel von einer zur anderen Kante erfolgen darf. Diese Regel macht allerdings nur Sinn, wenn sich beide Kanten in derselben vertikalen Ebene befinden. (vgl. XIAOTANG 2009: 15f.)

Die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Netzwerkanalysen durchzuführen sind, werden in den sogenannten Netzwerkattributen eingestellt. Zur besseren Veranschaulichung werden jene Attribute im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert: Wenn eine möglichst rasche LKW-Lieferung von Punkt A nach Punkt B erfolgen soll, so ist bei der Benutzung des Straßensystems die Minimierung der Fahrzeit von besonderem Interesse. In diesem Zusammenhang sind neben den Geschwindigkeitsbeschränkungen auch die maximal zulässigen Fahrzeughöhen der einzelnen Straßenabschnitte zu berücksichtigen, damit es zu keinem Unfall kommt. Außerdem spielt auch der Straßenrang eine Bedeutung, da ein größerer LKW wesentlich leichter entlang einer Schnellstraße als durch verkehrsberuhigte oder verwinkelte Siedlungsbereiche gelenkt werden kann. Um all diese Kriterien beim Berechnen der schnellsten Route für den LKW miteinzubeziehen, müssen die Kosten (hier: Fahrzeit pro Straßensegment zur Zeitminimierung), Deskriptoren (hier: Höchstgeschwindigkeit pro Straßensegment zur Berechnung der Fahrzeit), Beschränkungen (hier: maximal zulässige Fahrzeughöhe etwa bei der Unterquerung einer Brücke) sowie Hierarchie (hier: Schnellstraße versus Wohnstraße) für die einzelnen Elemente des Netzwerks festgelegt sein. Darüber hinaus können noch diverse Verkehrsregeln wie Einbahnen oder Abbiegeverbote integriert werden, die im Zuge der Netzwerkberechnung ebenfalls zu berücksichtigen sind. (vgl. XIAOTANG 2009: 16f.)

5.3.2. Ermittlung der optimalen Route

Die Ermittlung der optimalen Route funktioniert nach dem Prinzip der Wegfindung mittels Navigationssystem. In Abhängigkeit davon, welche Ressource man einsparen möchte – z. B. Minimierung des Faktors Zeit oder Distanz – wird die optimale Route durch ein gegebenes Netzwerk berechnet (siehe Abb. 13). (vgl. MEUSBURGER 2018: 44)

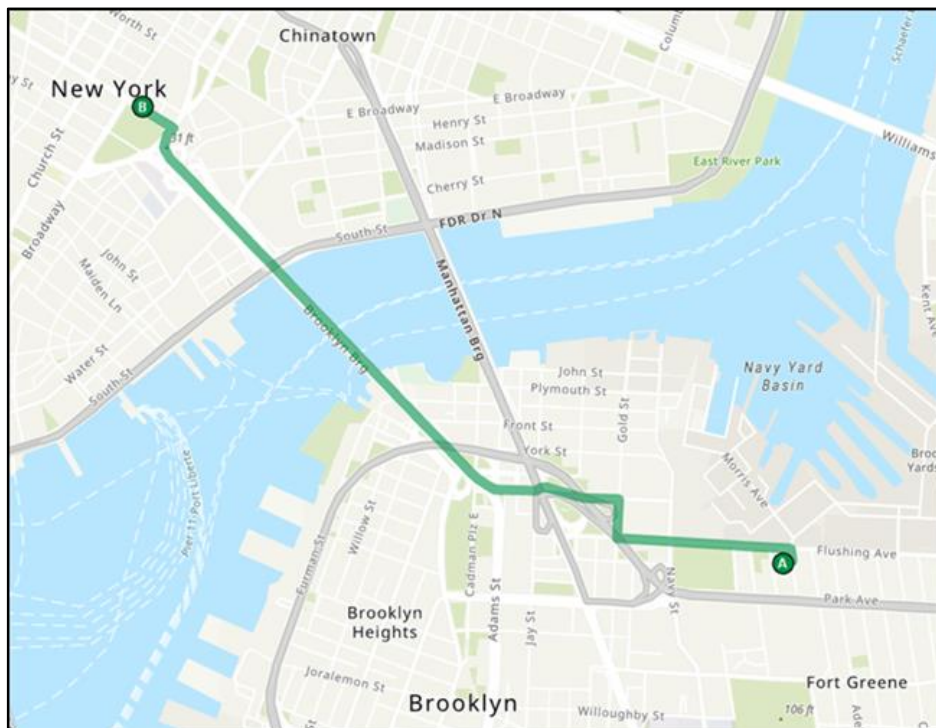


Abb. 13: Beispielhafte Darstellung einer optimalen Route von Punkt A nach B in einem Straßennetz (Quelle: ESRI 2020b)

Eine solche Berechnung ist in mehrere Routenanalyseklassen unterteilt, die sich wie herkömmliche Datenebenen in ArcGIS Pro getrennt voneinander betrachten und weiterbearbeiten lassen. Eine Routenanalyseklasse etwa umfasst die Stops, welche wiederum verschiedene Funktionen erfüllen können. Jede Route muss zumindest zwei gewöhnliche Stops – der eine als Startpunkt sowie der andere als Zielpunkt – aufweisen. Darüber hinaus lassen sich noch sogenannte Waypoints definieren, welche im Verlauf der Route passiert werden müssen, ohne jedoch dort anzuhalten. Diese Variante ermöglicht dem Nutzer bzw. der Nutzerin beispielsweise die manuelle Einflussnahme in die Berechnung der optimalen Route. Eine weitere Kategorie bilden die Breaks, die zwar ebenfalls im Verlauf der Route integriert werden, allerdings ein Pausieren des reisenden Objektes an dieser Stelle voraussetzen. Ein typischer Anwendungsfall für Breaks sind beispielsweise LKW-Lieferungen, bei denen der Fahrer bzw. die Fahrerin Pausen einlegen oder Ladetätigkeiten an diesem Ort durchführen muss. Auch die berechnete Route selbst kann in einer eigenen Routenanalyseklasse für den späteren Gebrauch gespeichert werden. Außerdem bieten sich noch weitere Routenanalyseklassen für diverse Punkt-, Linien- und Polygondaten an, anhand derer sich die Netzwerkanalyse verfeinern bzw. spezifizieren lässt. (vgl. MEUSBURGER 2018: 44f.)

5.3.3. Vehicle-Routing-Problem

Das Werkzeug zur Lösung eines Vehicle-Routing-Problems funktioniert nach dem Prinzip der Ermittlung der optimalen Route, wird jedoch um den Umstand erweitert, dass die Routen mehrerer Fahrzeuge optimal aufeinander abgestimmt werden (siehe Abb. 14). (vgl. MEUSBURGER 2018: 50)

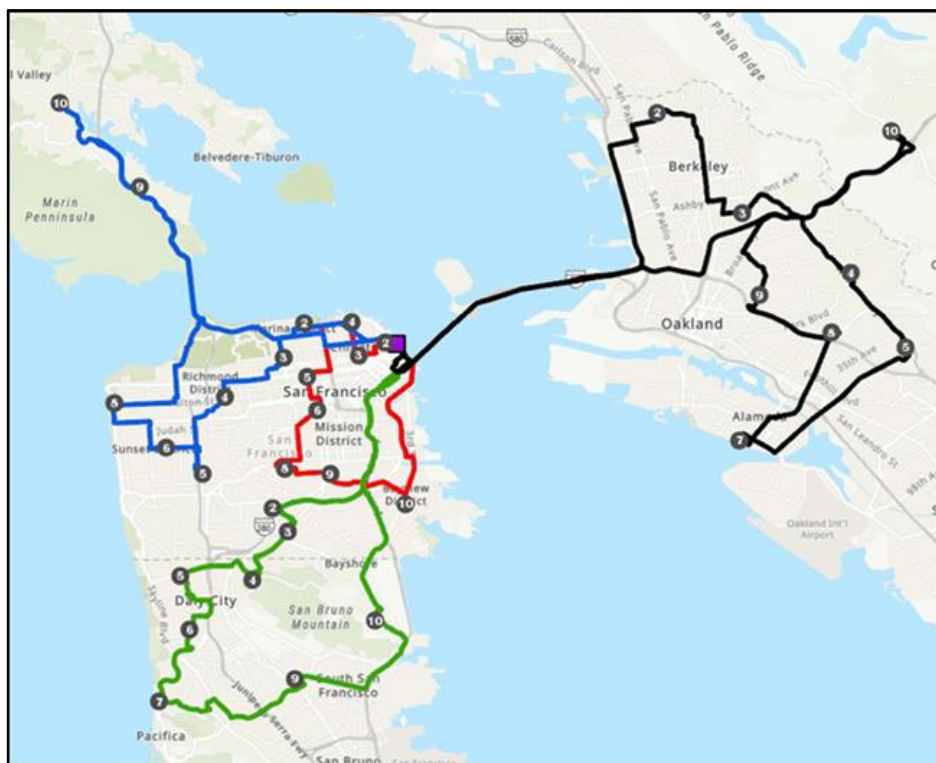


Abb. 14: Beispielhafte Darstellung der Streckenverläufe eines Vehicle-Routing-Problems (Quelle: ESRI 2020b)

Bei dieser Analyse ist es also möglich, den einzelnen Fahrzeugen einer Fahrzeugflotte jene Routen zuzuweisen, welche in Summe alle aufzusuchenden Standorte berücksichtigen und dabei die gesamten Fortbewegungskosten auf ein Minimum reduzieren. Diese Berechnung eignet sich beispielsweise ideal für die Verknüpfung der Lieferstandorte eines Versanddienstes oder der Haltestellen eines Busunternehmens. Anhand der Einstellung einer sogenannten „Start/End Depot Service Time“ kann zusätzlich berücksichtigt werden, wann die jeweiligen Dienste an bestimmten Standorten beginnen bzw. enden sollen. (vgl. MEUSBURGER 2018: 84)

5.3.4. Suche des nächstgelegenen Standortes

Die Suche des nächstgelegenen Standortes eignet sich besonders für die Mobilisierung von Einsatzkräften, etwa im Rahmen eines Polizei-, Feuerwehr- oder Rettungseinsatzes. Im Falle eines Verbrechens, Hausbrandes oder Unfalls wird somit rasch ermittelt, welche Einsatzstelle den schnellsten Weg zum Ereignisort aufweist, wodurch kostbare Zeit eingespart werden kann (siehe Abb. 15). (vgl. MEUSBURGER 2018: 48)

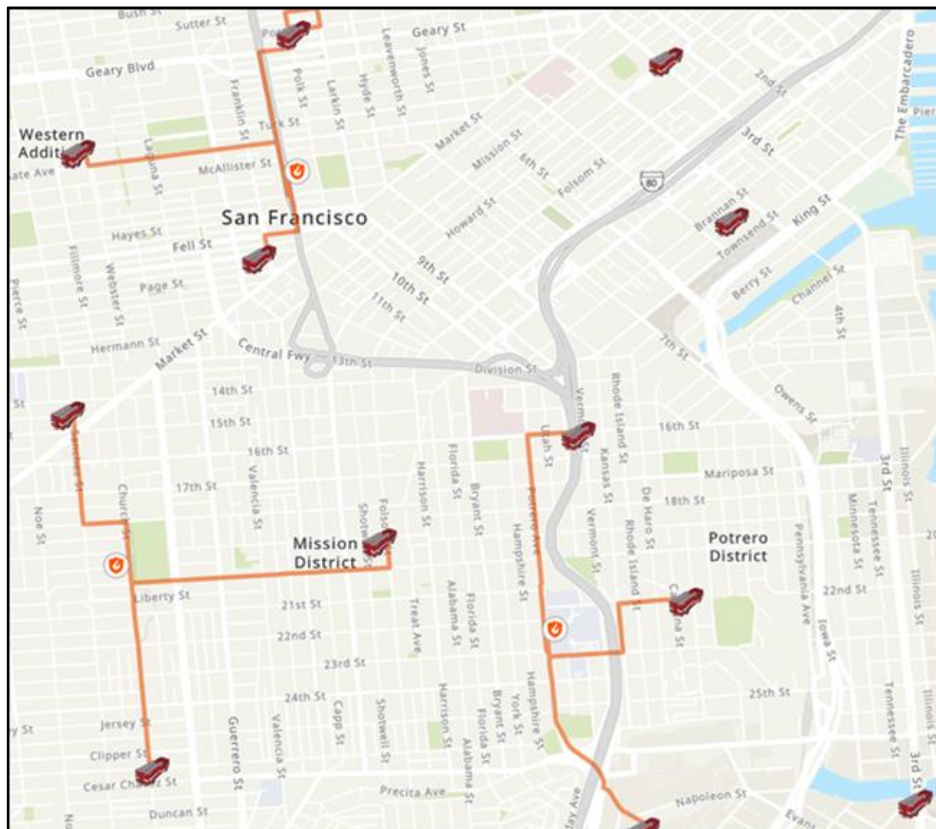


Abb. 15: Beispielhafte Darstellung der Ereignisorte samt ihrer nächstgelegenen Einsatzstellen (Quelle: ESRI 2020b)

Wie auch beim Ermitteln der optimalen Route lassen sich verschiedene Reisekosten wie Fahrzeit oder Distanz als Grundlage der Netzwerkanalyse einstellen. In Abhängigkeit von der gewählten Variante können aus der Analyse unter Umständen völlig verschiedene Routen resultieren. Des Weiteren lässt sich definieren, ob ausgehend von einem Standort nur eine einzige oder eine bestimmte Anzahl an nächstgelegenen Einrichtungen berechnet werden soll. Die Analyse lässt sich auch auf umgekehrte Weise vornehmen, indem die beste Route von der

Einrichtung zum Zielort ermittelt wird. Anhand diverser Einschränkungen kann die Suche weiter spezifiziert werden: So ist es eventuell erforderlich, nur jene Einrichtungen zu lokalisieren, welche maximal 15 Fahrminuten vom Einsatzort entfernt sind. (vgl. MEUSBURGER 2018: 48f.)

5.3.5. Einzugsgebietsanalyse

Im Zuge der Einzugsgebietsanalyse wird die umliegende Erreichbarkeit eines bestimmten Standortes flächenhaft in Abhängigkeit bestimmter Grenzkosten (Zeit oder Distanz) berechnet. Folglich sind die dadurch ermittelten Polygongrenzen – auch Isochronen genannt – ausgehend vom Standort innerhalb des Netzwerks exakt gleich schnell bzw. in gleicher Entfernung zu erreichen (siehe Abb. 16). Diese Funktionsweise bildet die wichtigste Grundlage für die in dieser Masterarbeit durchgeführte Netzwerkanalyse. (vgl. UNGER 2015: 49)

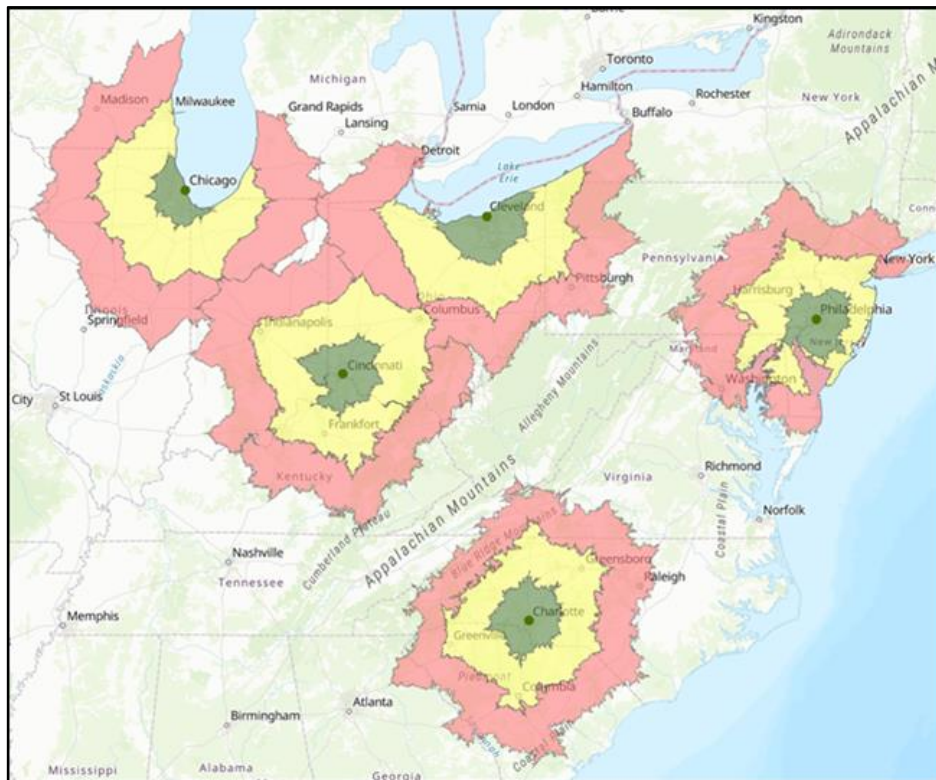


Abb. 16: Beispielhafte Darstellung der Einzugsgebiete einiger Standorte (Quelle: ESRI 2020b)

Bei der Berechnung von Einzugsgebieten lassen sich zahlreiche Parameter variieren, sodass die Analyse optimal an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden kann. So ist es etwa möglich, durch eine Abstufung des Grenzwertes mehrere Isochronen bzw. Erreichbarkeitspolygone zu erzeugen. Beispielsweise kann das Einzugsgebiet eines Bahnhofs etappenweise ermittelt werden, indem 15, 30 und 45 Minuten Gehzeit als Grenzwerte für FußgängerInnen eingerichtet werden. Die dadurch erzeugten Polygone lassen sich in weiterer Folge getrennt voneinander untersuchen oder mit anderen Datenebenen verschneiden, um noch differenziertere Aussagen zu erzielen. Auch die Einrichtungen bzw. Standorte, die zur Einzugsgebietsanalyse herangezogen wurden, sowie alle weiteren Punkt-, Linien- und Polygondatensätze können im Network Analyst in separaten Layern angelegt und unabhängig

voneinander weiterbearbeitet werden. Darüber hinaus bieten sich noch die Integration Barrieren oder Berücksichtigung von Reaktionszeiten an, um die Simulation an realistische Verhältnisse anzunähern. (vgl. MEUSBURGER 2018: 45f.)

5.3.6. Start-Ziel-Kostenmatrix

Das Grundprinzip der Start-Ziel-Kostenmatrix ist die Verknüpfung mehrerer Startpunkte mit mehreren Zielpunkten über ein Netzwerk, woraus die effizientesten Standortpaare errechnet und miteinander verglichen werden können. Diese Kostengegenüberstellung erfolgt sowohl kartografisch mittels Verbindungsachsen (siehe Abb. 17) als auch in tabellarischer Form, welche einen detaillierten Blick auf die Daten zulässt. (vgl. UNGER 2015: 50)

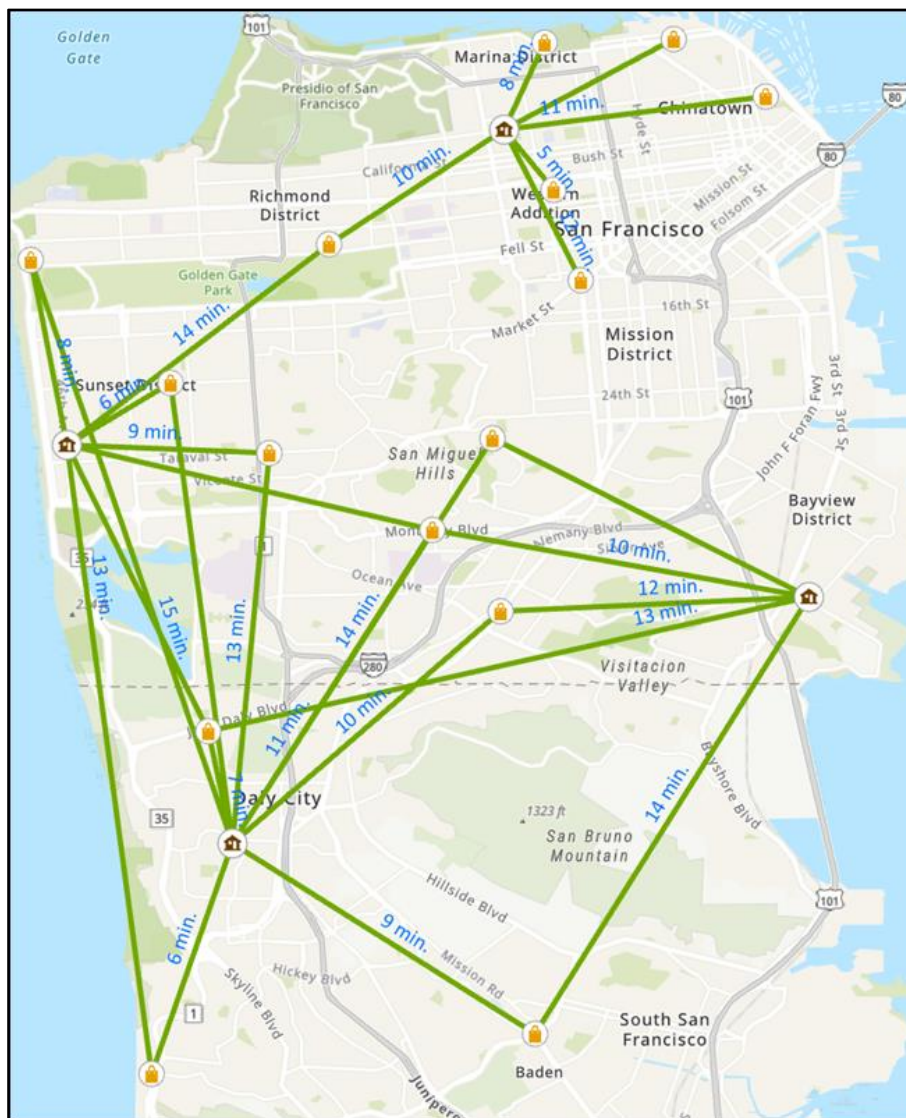


Abb. 17: Beispielhafte Darstellung der Verbindungsachsen einer Start-Ziel-Kostenmatrix (Quelle: ESRI 2020b)

In vielen wirtschaftlichen Anwendungsfällen ist es von Interesse, aus allen möglichen Verbindungsvarianten zwischen den Standorten eines Geschäftsprozesses die kostengünstigsten Routen herauszufiltern. Insbesondere jene Unternehmen, welche auf

Versand- bzw. Lieferdiensten basieren, sind auf derartige Optimierungen angewiesen. Diverse Parameter, wie etwa die Festlegung der Standortanzahl oder maximalen Distanzen, dienen dabei zur Präzisierung der Analyse. (vgl. MEUSBURGER 2018: 49f.)

5.3.7. Location-Allocation-Analyse

Auch das Location-Allocation-Analysewerkzeug des Network Analyst eignet sich für zahlreiche ökonomische Fragestellungen. Es unterstützt das Unternehmen bei der Suche nach neuen Standorten, wobei die Optimierung der Beschaffungswege, die Vergrößerung der Marktanteile sowie andere betriebswirtschaftliche Überlegungen berücksichtigt werden (siehe Abb. 18). (vgl. UNGER 2015: 51f.)

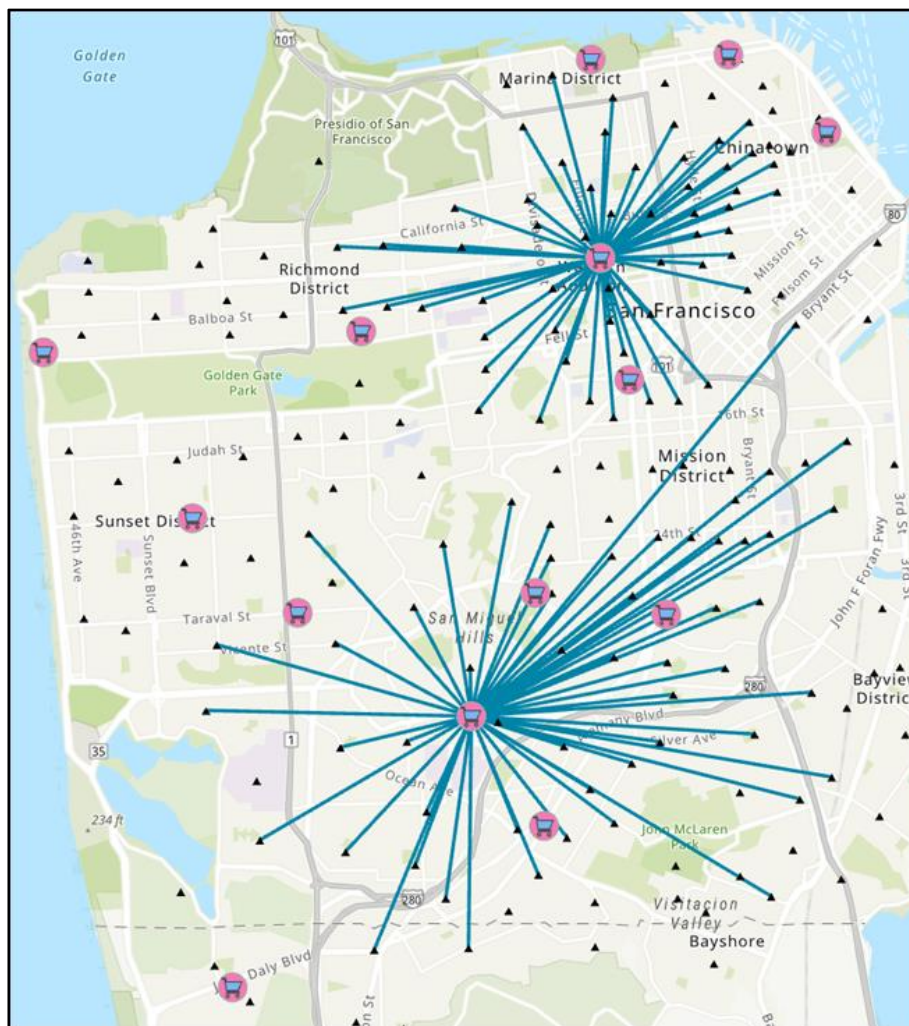


Abb. 18: Beispielhafte Darstellung einer Standortanalyse mit dem Location-Allocation-Tool (Quelle: ESRI 2020b)

In Abhängigkeit von den Anforderungen, die an einen neuen Standort gestellt werden, sind die Funktionen des Analysewerkzeugs zu justieren. Grundsätzlich lassen sich diese Einstellungen für sieben Problemtypen bzw. Verwendungszwecke vornehmen: Bei der Minimierung der Impedanz werden die Wegkosten (Entfernungen, Fahrzeiten etc.) so weit wie möglich reduziert. Die Maximierung der Flächendeckung steht dann im Fokus, wenn eine Einrichtung eine

möglichst große räumliche Reichweite aufweisen soll. Die Maximierung der zulässigen Abdeckung gewährleistet, dass die Kapazitäten einer Einrichtung voll ausgeschöpft werden, ohne jedoch ihre Limits zu überschreiten. Daneben ist es auch möglich, durch strategische Standortwahl die Anzahl der Einrichtungen zu minimieren. Hingegen kann die Erreichbarkeit von Standorten maximiert werden, indem die Bedarfsgewichtung mit der Distanz zwischen der Einrichtung und dem Bedarfsort in Beziehung gesetzt wird. Um den Marktanteil auszuweiten, muss der flächenhaft ausgeprägte Bedarf gegenüber den Mitbewerbern maximiert werden. Schließlich ist es auch möglich, die Mindestanzahl an Einrichtungen zu ermitteln, welche für die Eroberung eines bestimmten Marktanteils erforderlich ist. (vgl. MEUSBURGER 2018: 47f.)

6. Stand der Forschung

Dieses Kapitel bildet die Überleitung von der theoretischen Abhandlung zum praktischen Teil der vorliegenden Arbeit. Denn obwohl hier wie zuvor themenrelevante Publikationen vorgestellt sind, weisen sie deutlich stärkere inhaltliche und methodische Bezüge zur Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer auf. Deren Erkenntnisse bildeten wichtige Ansätze, auf denen die empirischen Untersuchungen der Masterarbeit aufbauen.

Das erste Subkapitel handelt von Distanzberechnungsmethoden und die Einsatzmöglichkeiten eines GIS für Netzwerkanalysen, wobei dort sowohl der Network Analyst als auch der ModelBuilder der Softwareumgebung „ArcGIS 9.2“ zum Einsatz kamen. Das zweite Subkapitel umfasst Empfehlungen zur Wahl geeigneter Datengrundlagen für GIS-Projekte. Darauf folgt eine Studie, in welcher für die Region Stuttgart messbare Indikatoren der Autoabhängigkeit samt räumlichen Parametern und Gewichtungsfaktoren entwickelt wurden. Im vierten Subkapitel ist eine Klassifizierungsmethode von Haltestellen des ÖV beschrieben. Zum Schluss sind Ansätze dargelegt, die sich mit der Erreichbarkeit von Einrichtungen der Daseinsvorsorge sowie ihrer Unterteilung in Entfernungsstufen auseinandersetzen.

6.1. Bedeutung von GIS für Erreichbarkeitsanalysen

Netzwerk- bzw. Erreichbarkeitsanalysen – wie zur Berechnung einer Verkehrsemissionssteuer auf Basis standörtlicher Gegebenheiten – stützen sich auf eine Vielzahl räumlicher Informationen. Geoinformationssysteme sind hervorragend dafür geeignet, eine Fülle an unterschiedlichsten Daten mit Raumbezug zu analysieren und visualisieren. Insbesondere für verkehrsplanerische Fragestellungen gilt der Einsatz eines GIS als bewährte Methodik, da die herangezogenen Geodaten transparent und nachvollziehbar verarbeitet sowie unter den PlanungspartnerInnen relativ einfach ausgetauscht werden können. Außerdem lassen sich diverse Informationsebenen – angefangen von punktuellen Standorten und linienhaften Straßennetzen bis hin zu Flächenwidmungs-, Bebauungs- oder demographischen Plänen mit flächenhafter Ausprägung – überlagern und je nach Untersuchungsthematik miteinander kombinieren. (vgl. ÖAW 2009: 1f.)

Im Rahmen der nun vorgestellten Studie wurden räumliche Potenzialmodelle für zentrale Einrichtungen in Wien untersucht und dabei die Einsatzmöglichkeiten eines GIS getestet. Neben diversen Geoverarbeitungswerkzeugen zur Unterstützung von Erreichbarkeitsanalysen wurde auch die Programmkomponente „ModelBuilder“ der Softwareumgebung „ArcGIS 9.2“ erprobt. Diese Anwendung ermöglicht es, die gesamte Prozesskette der Geoverarbeitung eines Projektes graphisch darzustellen und jederzeit anzupassen. Umfassende Programmierkenntnisse sind hierbei nicht vonnöten, weil das GIS eine beachtliche Menge an vorgefertigten Werkzeugen bereithält, die beliebig in das Prozessmodell eingebunden werden können. Auch die Geodaten lassen sich an jeder Stelle neu einspeisen oder austauschen, sodass die Möglichkeit standardisierter bzw. automatisierter Programmabläufe besteht. (vgl. ÖAW 2009: 4)

Zentrale Aufgabe in dieser Studie war u. a. die Gegenüberstellung unterschiedlicher Distanzberechnungsmethoden zwischen ÖPNV-Haltestellen und den potenziellen

NachfragerInnen, wobei die Optimierung des Fußweges im Fokus stand. Dabei konnten beachtliche Abweichungen zwischen der euklidischen Distanz (Entfernung entlang einer Luftlinie) sowie der Netzwerkdistanz (Entfernung entlang Straßen- bzw. Wegverläufen) festgestellt werden. Ausgehend von einem Standort – hier im Falle einer ÖPNV-Haltestelle – wurde für die Berechnungsvarianten jeweils die Größe der umspannenden Fläche gemessen, welche innerhalb einer definierten Längenangabe erreichbar ist (siehe Abb. 19). Bei der euklidischen Distanzmessung ohne Umwegfaktor ergibt sich eine Kreisfläche mit einem Radius von 350 Metern um die betreffende Haltestelle. Wird dieser Radius durch einen Umwegfaktor von 1,2 dividiert, sodass die Luftliniendistanz an die tatsächliche fußläufige Entfernung angenähert ist, dann ergibt sich ein realitätsnäherer Radius von gerundeten 292 Metern. Schließlich wurde im Zuge der dritten Berechnungsmethode die Netzwerkdistanz von 350 Metern herangezogen und ein entsprechendes Polygon um den Ausgangspunkt gebildet. (vgl. ÖAW 2009: 1, 3, 5f.)

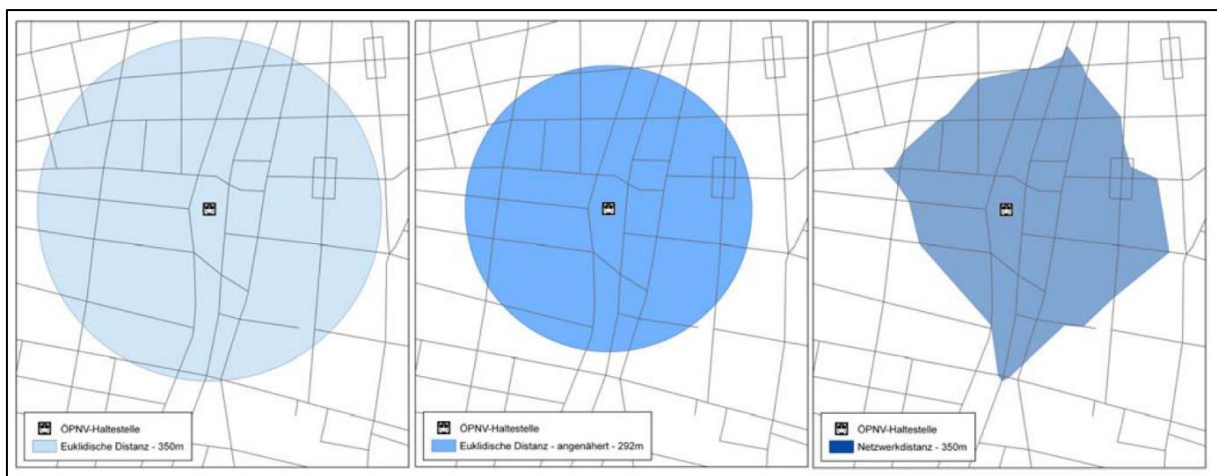


Abb. 19: Graphische Gegenüberstellung der drei Distanzberechnungsmethoden (Quelle: ÖAW 2009: 6)

Bereits bei bloßer Betrachtung der Umrise lässt sich eine stufenweise Angleichung des Einzugsgebiets an die tatsächlichen Entfernungsverhältnisse feststellen. Werden diese Flächen jedoch mit räumlichen Daten gekoppelt, so kann jene Optimierung anhand konkreter Zahlen verdeutlicht werden. Im Falle der vorgestellten Studie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) wurden diese Pufferflächen mit einer Bevölkerungsebene verschnitten, da im räumlichen Kontext einer ÖPNV-Haltestelle insbesondere die Erreichbarkeit für die umliegenden EinwohnerInnen von Bedeutung ist. Tabelle 2 zeigt die Auswirkungen der drei Distanzberechnungsmethoden auf die Einwohnerzahlen und Flächengrößen der Einzugsgebiete. (vgl. ÖAW 2009: 7)

Berechnungsmethode	EinwohnerInnen	Pufferfläche in m ²
Euklidische Distanz ohne Umwegfaktor (350 m)	7.919	384.698
Euklidische Distanz mit Umwegfaktor (292 m)	5.975	267.742
Netzwerkdistanz (350 m)	4.131	219.301

Tab. 2: Mathematische Gegenüberstellung der drei Distanzberechnungsmethoden in Form der Einwohnerzahlen und Pufferflächen (Datengrundlage: ÖAW 2009: 7; eigene Darstellung, 2020)

Bei der mathematischen Gegenüberstellung wird deutlich, dass sich einhergehend mit der Annäherung an die tatsächlichen Entfernungsverhältnisse die Bevölkerungs- und Flächenzahlen verringern. Dabei wurden auf Basis der Netzwerkdistanz die genauesten Ergebnisse ermittelt, weil auch die FußgängerInnen bzw. RadfahrerInnen in der Realität an den Verlauf von Straßen und Wegen gebunden sind. Hier kann die Berechnung noch exakter erfolgen, wenn die einzelnen Segmente des Netzwerkes mit zusätzlichen Faktoren – wie etwa Verkehrsregeln, Steigungen oder Bodenbeschaffenheiten – versehen werden. Für solche Netzwerkanalysen eignet sich die Erweiterung „Network Analyst“ der Geoinformationssoftware „ArcGIS 9.2“, welche im Zuge der Berechnung verschiedene Datenebenen miteinander verschneiden kann und die Möglichkeit von Wegekosten, Restriktionen, Gewichtungen und anderen Netzwerkanpassungen bietet. (vgl. ÖAW 2009: 7f.)

Sowohl für die Studie der ÖAW als auch für die Untersuchungen der vorliegenden Masterarbeit erwies sich im Rahmen der Netzwerkanalyse das Geoverarbeitungswerkzeug „Service-Area-Tool“ als besonders unterstützend. Es berechnet die erwünschten Einzugs- bzw. Erreichbarkeitsflächen ausgehend von konkreten Standorten und stellt diese mittels Polygone dar. Die Distanzgewichtung erfolgt anhand einer diskreten Zonierung, bei welcher fixe Entfernungsklassen mit dazwischen befindlichen Schwellenwerten gebildet werden. In beiden Arbeiten wurden ausgehend vom Standort zwei Erreichbarkeitszonen definiert. Alle darüber hinausreichenden Distanzen sind nicht mehr Teil des Einzugsgebiets bzw. entsprechen keinen fußgängergerechten Weglängen. Anschließend wurden den Zonen im Rahmen der Studie entsprechende Gewichtungsfaktoren zugeordnet, um daraus den Versorgungsgrad ableiten zu können. Durch die räumliche Verschneidung mit Bevölkerungszellen konnten noch tiefergehende Aussagen in Bezug auf die Versorgungsqualität der untersuchten ÖPNV-Haltestellen getroffen werden. (vgl. ÖAW 2009: 13f., 25)

Im Vergleich dazu wurden die gewichteten Erreichbarkeitszonen in der vorliegenden Masterarbeit mit den Erreichbarkeitspolygonen anderer Objekttypen (Einrichtungen der Daseinsvorsorge) verschnitten, um eine standörtliche Bemessungsgrundlage für die Berechnung der Verkehrsemissionssteuer zu generieren. Dabei wurden alle Netzwerkanalysen, Zonengewichtungen und diverse andere Datenverarbeitungsprozesse – wie in der ÖAW-Studie – mithilfe des ModelBuilders umgesetzt, um einen (teil-)automatisierten Programmablauf sowie die nachträgliche Anpassung der gesetzten Parameter vornehmen zu können.

6.2. Wahl der geeigneten Datengrundlage

Jedes GIS-Projekt erfordert eine sorgfältig gewählte Datengrundlage, um die Ergebnisse in gewünschter Qualität und Detailgenauigkeit erzielen zu können. Auch für die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden hohe Ansprüche an die zu verarbeitenden Geodaten gestellt. Der wissenschaftliche Beitrag mit dem Titel „Verfahren der GIS-Modellierung von Erreichbarkeiten für Schlaganfallversorgungszentren“ von RAUCH und RAUH bot – neben ähnlichen Publikationen – hilfreiche Anhaltspunkte für die Wahl der geeigneten Datengrundlage. Auch in dieser Studie wurden Methoden zur routingbasierten Erreichbarkeitsberechnung mithilfe eines GIS untersucht, wobei den zugrundeliegenden Datensätzen besondere Aufmerksamkeit beigemessen wurde. (vgl. RAUCH und RAUH 2016: 437)

Die Autoren haben für ihre Arbeit raumbezogene Daten von OpenStreetMap (OSM) herangezogen und deren entscheidende Vorteile sowie Eignung für wissenschaftliche Projekte – auch unter Verweis auf andere Publikationen – aufgezeigt. Zunächst lässt sich festhalten, dass es sich hierbei um Open Data handelt, welche per Definition grundsätzlich allen NutzerInnen frei und für jeden Zweck zur Verfügung stehen. Darüber hinaus sind sie meist flächendeckend vorhanden und durch eine hohe Auflösung charakterisiert. Ihr vektorisiertes Datenformat, dessen Eigenschaften nachfolgend noch genauer erläutert werden, eignet sich für eine Reihe von Anwendungsbereichen in der Geoinformationsverarbeitung. Schließlich erfreuen sich OSM-Daten insbesondere bei routing- bzw. netzwerkbasierten Untersuchungen immer größerer Beliebtheit. (vgl. RAUCH und RAUH 2016: 441f.)

Im Vergleich zu Rasterdaten bietet das Vektorformat klare Vorteile, allerdings auch gewisse Nachteile. Eine große Stärke von vektorisierten Daten ist ihre geringe Komplexität und damit einhergehend sowohl ihr günstiger Speicherbedarf als auch ihr niedriger Rechenaufwand. Dank der zugrundeliegenden geometrischen Formulierung weisen sie exakt definierte Positionen und Lagebeziehungen auf und lassen sich daher von anderen Objekten bzw. Gebieten klar abgrenzen. Diesem Umstand ist auch ihre maßstabsunabhängige Auflösungsgüte zu verdanken, welche in allen Zoomstufen eine konstante geometrische Genauigkeit gewährleistet. Vor allem Erreichbarkeitsanalysen mit großen Datenmengen werden aufgrund der genannten Vorteile erheblich unterstützt. Als nachteilig muss hervorgehoben werden, dass die Isochronen (Außengrenzen von Polygonen) standardmäßig keine inneren Differenzierungen bzw. Verläufe zulassen und somit als statisch bzw. unflexibel gelten. Jedoch hat sich das Vektorformat auch für die Zwecke der vorliegenden Masterarbeit als geeignet erwiesen, was insbesondere auf die einfache Handhabung der Daten und klar abgrenzbare Darstellung der Ergebnisse zurückzuführen ist. (vgl. RAUCH und RAUH 2016: 442f.)

6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit

Der Grad der Autoabhängigkeit spielt für die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionsteuer eine fundamentale Rolle, da die Verfügbarkeit alternativer Mobilitätsformen für die Höhe des Steuersatzes ausschlaggebend ist. Sofern sich ein Hauptwohnsitz beispielsweise in Zentrumsnähe einer Großstadt und somit in fußläufiger Reichweite zu Einrichtungen des täglichen Bedarfs sowie bedeutenden Haltestellen des ÖV befindet, ist die dort gemeldete Person für den Besitz ihres PKW zur Abgabe einer höheren Verkehrsemissionssteuer angehalten. Umgekehrt gilt eine niedrigere steuerliche Bemessung für jene Hauptwohnsitze, die etwa in einer ländlichen Siedlung mit mangelhafter fußläufiger Anbindung wohnen und infolgedessen stärker auf die Nutzung eines PKW angewiesen sind. Um diese Steuerbemessung auf adäquate Weise festlegen zu können, ist die Quantifizierung der regionalen Autoabhängigkeit erforderlich.

SIEDENTOP et al. haben sich im Zuge ihres wissenschaftlichen Beitrags mit der Fragestellung auseinandergesetzt, wie sich die Autoabhängigkeit von Bewohnern städtischer und ländlicher Siedlungsgebiete in der Region Stuttgart messen lässt. Dabei haben sie aufgezeigt, dass zerstreute und gering verdichtete Siedlungsstrukturen sowohl mit einem höheren Motorisierungsgrad als auch mit einer gestiegenen PKW-Fahrleistung korrelieren. Obwohl die bauliche bzw. verkehrstechnische Infrastruktur eines Wohngebiets zahlreiche Rückschlüsse auf

den Grad der Autoabhängigkeit zulässt, wird letztere auch von subjektiven Faktoren wie etwa durch Statussymbole, Lebensstile, Sicherheits- oder Bequemlichkeitsansprüche von VerkehrsteilnehmerInnen beeinflusst. Will man daher ausschließlich personenneutrale Parameter ermitteln, so wird von Indikatoren basierend auf der Verfügbarkeit und Nutzung der Fahrzeuge abgeraten, da hier nicht zwischen objektiver und subjektiver Autoabhängigkeit unterschieden werden kann. Wenn die Messung jedoch rein standortspezifisch und erreichbarkeitsbezogen erfolgt, kann eine möglichst hohe Objektivität erzielt werden. (vgl. SIEDENTOP et al. 2013: 329-332)

Diese Überlegung ist auch in die wissenschaftliche Arbeit von SIEDENTOP et al. eingeflossen. Dabei wurden die zu messenden Indikatoren von den Autoren in zwei Gruppen gegliedert: Zum einen wurde das standörtliche Angebot des öffentlichen Verkehrs in der Region Stuttgart erfasst, indem sowohl die Erreichbarkeit als auch die Angebotsqualität der Haltestellen im ÖV-Netz untersucht wurden. Dies erfolgte beispielsweise anhand der ÖV-Zugangsweite, welche die durchschnittliche Entfernung eines Wohnortes zur nächstgelegenen Haltestelle definiert und als Anknüpfungspunkt an den ÖV zu verstehen ist. Ein weiterer wichtiger Indikator in dieser Gruppe stellt die ÖV-Bedienungshäufigkeit dar. Hierbei handelt es sich um den Durchschnitt der angebotenen Fahrten an einer Haltestelle pro Tag. Ergänzend dazu hat sich die Studie mit der Frage auseinandergesetzt, welche Einrichtungen des täglichen Bedarfs häufiger aufgesucht werden und deshalb ebenso in Hinblick auf die Entfernung zu einem Wohnstandort von besonderem Interesse sind. Diese zweite Indikatorengruppe „Daseinsvorsorge“ umfasst die durchschnittlichen Distanzen zum nächstgelegenen Supermarkt, zum nächstgelegenen Hausarzt, zur nächstgelegenen Apotheke sowie zur nächstgelegenen Grundschule. (vgl. SIEDENTOP et al. 2013: 332f.)

Da die herangezogenen Indikatoren durch unterschiedliche Skalen und Prioritäten gekennzeichnet sind, ist ihre Klassifizierung oder Standardisierung sowie ihre Gewichtung notwendig, um deren Werte aggregieren zu können. Beim Klassifikationsverfahren mit absoluten Schwellenwerten können sich die Klassengrenzen auf technische Regelwerke, Umfrageergebnisse oder Experteneinschätzungen beziehen. Diese Vorgehensweise ist insbesondere bei der Abstufung von Entfernungen gebräuchlich, welche in der Regel ab dem Wohngebäude gemessen werden, da die meisten Wege bzw. Wegekettten bei der Wohnungstür beginnen oder enden. In Bezug auf die ÖV-Zugangsweite sind die Autoren der Ansicht, dass bei einer Entfernung bis zu 400 Metern tendenziell eine geringe Autoabhängigkeit vorherrscht, während Distanzen von über 400 bis 800 Metern bereits eine größere Angewiesenheit auf den PKW nach sich ziehen. Jene Haltestellen, die sich abseits einer Reichweite von 800 Metern befinden, gelten für den NMIV als schlecht oder nicht zugänglich und drängen die VerkehrsteilnehmerInnen daher stark zur Nutzung eines PKW. Diese Schwellenwerte lassen sich auch in anderen Publikationen wiederfinden: So schreibt KNAPP (vgl. 1998: 341), dass in der deutschen Verkehrsplanung ÖPNV-Distanzen bis zu 400 Meter als gut erschlossen gelten, während laut BMVBS (vgl. 2011: 35) bereits ab 800 Meter der MIV – zumindest bei Einkaufswegen – stark zunimmt. Doch die absolute Klasseneinteilung kommt auch bei anderen Indikatoren wie etwa zur Bestimmung der ÖV-Angebotsqualität an einer Haltestelle zum Einsatz. Im Falle der ÖV-Bedienungshäufigkeit ziehen die Autoren folgende Abstufung heran: Bei über 100 Abfahrten pro Tag handelt es sich um eine sehr geringe Autoabhängigkeit. Über 40 bis 100 Abfahrten pro Tag verweisen auf eine Autoabhängigkeit geringeren bzw. mittleren Grades. Hingegen ist eine höhere Autoabhängigkeit bei über 13 bis 40 Abfahrten pro Tag

vorhanden und eine Bedienungshäufigkeit bis zu 13 Abfahrten pro Tag geht bereits mit einer sehr hohen Autoabhängigkeit einher. (vgl. SIEDENTOP et al. 2013: 333f.)

Nachdem in der Studie die Klassifizierungen mit geeigneten Schwellenwerten vorgenommen wurde, führten die Autoren die Netzwerkanalyse mittels GIS durch. Bei der Untersuchung der Erreichbarkeit muss von einer Mobilitätsform ausgegangen werden, die möglichst frei von materiellen oder physischen Einschränkungen und folglich für alle Bevölkerungsteile gleichermaßen anwendbar ist. Aus diesem Grund wurde für die Analysen ein spezielles Netzwerk herangezogen, welches ausschließlich Straßen und Wege beinhaltet, die von FußgängerInnen oder RadfahrerInnen benutzt werden können. Dieses Kriterium erfordert die selektive Bereinigung des Straßennetzes, indem u. a. Autobahnen entfernt, Fuß- und Feldwege hingegen in das Netzwerk integriert werden. Danach wurden sowohl die ÖV-Zugangsweite als auch die Entfernungen zu den Einrichtungen der zweiten Indikatorengruppe (Supermärkte, Hausärzte, Apotheken und Grundschulen) für die Netzwerkanalysen herangezogen. (vgl. SIEDENTOP et al. 2013: 334f.)

Nachdem die Klassifikation und Messung der Indikatoren abgeschlossen wurden, mussten diese noch vereinheitlicht werden, um letztlich den Grad der Autoabhängigkeit aus der Aggregation aller Messwerte ableiten zu können. Indem Letztere auf ein einheitliches Intervall – z. B. von 0 bis 1 – projiziert werden, wird die Vergleichbarkeit und mathematische Operationalisierbarkeit zwischen den unterschiedlich skalierten Indikatoren ermöglicht. Im Zuge dieser Standardisierung sollten auch Gewichtungsfaktoren einbezogen werden, weil davon auszugehen ist, dass nicht alle Indikatoren dieselbe Wertigkeit aufweisen. Beispielsweise wird für die Mehrheit der Bevölkerung die Nähe eines Supermarktes von größerer Bedeutung sein als jene einer Apotheke, da letztere im Allgemeinen seltener aufgesucht wird. Darüber hinaus lässt sich beim Vergleich der beiden Indikatorensets „Öffentlicher Verkehr“ und „Daseinsvorsorge“ feststellen, dass die standörtliche Qualität des öffentlichen Verkehrsangebotes etwas wichtiger erscheint als die Erreichbarkeit von Einrichtungen der Daseinsvorsorge. Die Begründung liegt darin, dass durch eine gute ÖV-Anbindung auch entferntere Einrichtungen des täglichen Bedarfs oder generell andere Ortschaften erreicht werden können. Befinden sich jedoch ausschließlich die Einrichtungen der Daseinsvorsorge im näheren Umfeld eines Wohnortes, so bleibt der/die VerkehrsteilnehmerIn ohne PKW lokal isoliert. (vgl. SIEDENTOP et al. 2013: 335f.)

Tabelle 3 gibt Aufschluss über die Gewichtungen, wie sie von den Autoren dieser Studie vorgenommen wurden. Die Summe der Gewichtungsfaktoren aller Indikatoren ergibt 1.

Indikatorenset „Öffentlicher Verkehr“		Indikatorenset „Daseinsvorsorge“	
Indikator	Gewichtung	Indikator	Gewichtung
Zugangsweite	0,15	Supermärkte	0,15
Bedienungshäufigkeit	0,15	Grundschulen	0,12
Bedienungszeitraum	0,10	Hausärzte	0,08
Reisezeitverhältnis	0,10	Apotheken	0,05
Vernetzung	0,10		
Summe	0,60	Summe	0,40

Tab. 3: Gewichtung der Indikatoren, unterteilt nach Indikatorensets (Datengrundlage: SIEDENTOP et al. 2013: 336; eigene Darstellung, 2020)

Trotz vieler Parallelen ist die vorgestellte Studie in Bezug auf Daten und Methodik teilweise anders aufgebaut als diese Masterarbeit. Ein Unterschied besteht darin, dass die Autoren für die Erfassung der ÖV-Angebotsqualität lediglich die Durchschnittswerte ganzer Verkehrszellen und nicht die konkreten Werte einzelner Haltestellen heranziehen. Außerdem berücksichtigen sie nur die Entfernung eines Wohnortes zur nächstgelegenen Haltestelle und nicht wie bei dieser Masterarbeit auch die umliegenden Haltestellen in Kombination mit ihrer Bedienungsqualität. Darüber hinaus wurde die Netzwerkanalyse in dieser Studie auf Basis eines Rasters mit Zellen von einem Kilometer Seitenlänge durchgeführt. Die genannten Unterschiede bewirken eine viel gröber aufgelöste räumliche Differenzierung, welche sich für die Berechnung einer individuellen Verkehrsemissionssteuer nicht eignet. Ein weiterer Unterschied zeigt sich darin, dass diese Studie lediglich Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge einbezieht, wohingegen in dieser Masterarbeit zusätzlich die Anzahl der im Haushalt wohnenden Personen mit eingeschränkter Mobilität berücksichtigt wird. Dennoch konnten dieser Studie einige wertvolle Anhaltspunkte entnommen werden, um die Messbarkeit der Indikatoren, ihre adäquate Einteilung in Werteklassen sowie ihre geeignete Gewichtung vorzunehmen.

6.4. Klassifizierung der Haltestellen des ÖV

Für die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer wäre es unzureichend, lediglich die Entfernung zur nächstgelegenen Haltestelle in den Analysen zu berücksichtigen. Beispielsweise kommt es in der Realität des Öfteren vor, dass sich in unmittelbarer Nähe zum Wohnort eine Bushaltestelle befindet, welche jedoch zu selten oder unregelmäßig bedient wird. In diesem Fall wäre etwa ein Bahnhof, der nur 400 Meter weiter entfernt liegt und eine hohe Bedienungshäufigkeit aufweist, deutlich attraktiver für die Erreichung bestimmter Ziele. Aus diesem Grund musste für diese Masterarbeit eine Möglichkeit gefunden werden, in die Netzwerkanalysen nicht nur die Distanzen zu den Haltestellen, sondern auch deren Angebotsqualität zu integrieren.

Mit der Entwicklung eines Umsetzungskonzeptes für österreichweite ÖV-Güteklassen hat die ÖROK einen soliden Ansatz zur Bestimmung der Angebotsqualität im öffentlichen Verkehr aufgestellt. Idee hinter diesem Projekt war es, alle Haltestellen im Bundesgebiet mittels Kombination von Bedienungsqualität und fußläufiger Erreichbarkeit nach ihrer Güte zu kategorisieren. Da für diese Klassifizierungsmethode fixe Linien und Fahrpläne herangezogen werden mussten, konnten alternative Betriebsformen wie Mikro-ÖV-Systeme bzw. bedarfsorientierte Beförderungsvarianten nicht berücksichtigt werden. Außerdem weisen solche alternativen Systeme meistens keine finanzielle Stabilität auf oder sind nicht von allen Personengruppen frei nutzbar – z. B. nur durch Nachweis einer Vereinsmitgliedschaft. Wie in der vorhergehenden Studie lag in diesem Projekt ebenso die fußläufige Erreichbarkeit im Fokus der Analysen, weshalb das Aufsuchen von Haltestellen per Fahrrad oder Auto nicht Gegenstand der Untersuchung war. (vgl. ÖROK 2017: 7f.)

Nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Prozess zur Bildung der ÖV-Güteklassen nach ÖROK:

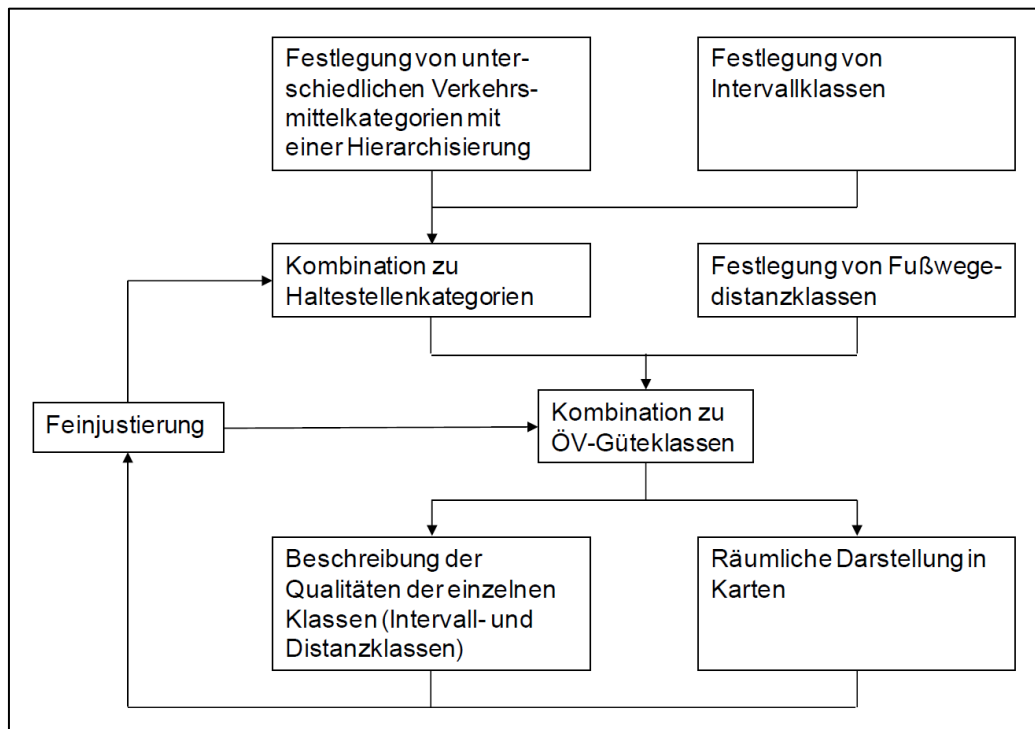


Abb. 20: Prozess zur Bildung der ÖV-Güteklassen (Quelle: ÖROK 2017: 11)

In Abbildung 20 ist ersichtlich, dass zunächst die Verkehrsmittelkategorien und Intervallklassen festgelegt wurden. Während es sich bei Ersteren um eine hierarchische Gliederung der unterschiedlichen Verkehrsmittel handelt (Fernverkehr, S-Bahn, Bus etc.), beziehen sich Letztere auf die Abstufung der Bedienungshäufigkeit. Anschließend wurden diese beiden Faktoren zu sogenannten Haltestellenkategorien kombiniert. Parallel dazu wurden Fußwegedistanzklassen festgelegt, indem die fußläufigen Realdistanzen basierend auf einem Straßen- und Wegenetz der Graphenintegrationsplattform (GIP) ermittelt wurden. Dann fand wiederum eine Kombination dieser Werte mit den Haltestellenkategorien statt, woraus schließlich die ÖV-Güteklassen resultierten. Zuletzt wurden die finalen Klassen hinsichtlich ihrer Qualität beschrieben sowie die Ergebnisse mittels Karten räumlich visualisiert. In dieser Projektarbeit wird darauf hingewiesen, dass sich die ÖV-Güteklassen mithilfe von GIS analysieren und darstellen lassen. Die dabei gebildeten Polygone der Haltestellen sind dazu geeignet, mit weiteren Datenebenen verschnitten zu werden, um weitergehende Untersuchungen vornehmen zu können. (vgl. ÖROK 2017: 11f., 17, 20)

Der vorgestellte Ansatz von ÖROK diene als methodisches Vorbild für Teile dieser Masterarbeit. Jene Netzwerkanalysen, welche sich auf die Erreichbarkeit und Angebotsqualität der Haltestellen beziehen, entsprechen dieser Vorgehensweise. Außerdem wurde auch hier das bewährte Straßen- und Wegenetz der GIP herangezogen. Der Unterschied zwischen den beiden Arbeiten liegt in der vereinfachten Klassifizierungsmethodik im Rahmen der Masterarbeit, weil diese noch weitere Untersuchungsgegenstände einbezieht und daher die detailgetreue Übernahme des ÖROK-Ansatzes den vorgegebenen Arbeitsumfang gesprengt hätte.

6.5. Erreichbarkeit der Daseinsvorsorge

Die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer berücksichtigt nicht nur Haltestellen und Bedienungsqualität im ÖV, sondern schließt auch die Erreichbarkeit wichtiger Einrichtungen der Grundversorgung mit ein. Deshalb werden im Folgenden repräsentative Maßzahlen eines wissenschaftlichen Papers von HALBRÜGGE und TAEGER angeführt, in welchem die Daseinsvorsorge mithilfe einer GIS-gestützten Erreichbarkeitsanalyse untersucht wurde.

Sowohl bei SIEDENTOP et al. (vgl. 2013: 333) als auch bei der Untersuchung von HALBRÜGGE und TAEGER (vgl. 2018: 318) wurden Apotheken, Grund- bzw. Volksschulen, Hausärzte bzw. Allgemeinmediziner und Supermärkte als jene Bereiche der Daseinsvorsorge hervorgehoben, welche von der Bevölkerung im Allgemeinen am häufigsten aufgesucht werden. Aus diesem Grund erhielten sie sowohl in beiden erwähnten Studien als auch in der vorliegenden Masterarbeit einen besonderen Stellenwert.

In Tabelle 4 wird die Einstufung dieser Einrichtungen in eine gute, mäßige und schlechte Erreichbarkeit veranschaulicht. Die dort gebildeten Distanzklassen orientieren sich nach der Zugänglichkeit für FußgängerInnen, wobei die durchschnittliche Gehgeschwindigkeit des Menschen (80 m pro Minute bzw. 10 Gehminuten für 800 m) als Bemessungsgrundlage herangezogen wurde. (vgl. HALBRÜGGE und TAEGER 2018: 318)

	Apotheken	Grundschulen	Hausärzte	Supermärkte
Gute Erreichbarkeit	≤ 800 m	≤ 1.000 m	≤ 800 m	≤ 500 m
Mäßige Erreichbarkeit	800 – 1.200 m	1.000 – 2.000 m	800 – 1.200 m	500 – 1.000 m
Schlechte Erreichbarkeit	> 1.200 m	> 2.000 m	> 1.200 m	> 1.000 m

Tab. 4: Einstufung der Daseinsvorsorge in eine gute, mäßige und schlechte Erreichbarkeit (Datengrundlage: HALBRÜGGE und TAEGER 2018: 318; eigene Darstellung, 2020)

Auffällig ist, dass die Distanzschwellenwerte bei den Supermärkten niedriger als bei den Apotheken und Hausärzten ausfallen, während letztere beiden Einrichtungstypen wiederum niedrigere Schwellenwerte als die Grundschulen aufweisen. Dies scheint mit dem Umstand zusammenzuhängen, dass Supermärkte in der Regel häufiger als Apotheken und Hausärzte aufgesucht werden und daher geringere Entfernungen eine etwas größere Rolle spielen. Grundschulen sind jedoch im Gegensatz zu den anderen drei Einrichtungstypen lediglich für einen Teil der Bevölkerung relevant, weshalb hier etwas größere Entfernungen angemessen erscheinen.

7. Untersuchungsgebiet Steiermark

Die Wahl des Untersuchungsgebiets wurde in Hinblick auf qualitative Analysen und repräsentative Ergebnisse, welche die Thematik der Masterarbeit kartographisch am besten zur Geltung bringen, getroffen. Dabei war die räumliche Heterogenität ein entscheidendes Kriterium, um im Rahmen der Untersuchung eine möglichst hohe Bandbreite an Einflussgrößen berücksichtigen zu können. Außerdem wurde ein hohes Niveau der verfügbaren Geodaten hinsichtlich ihres Umfangs, ihrer Genauigkeit und Aktualität verlangt. Diese Anforderungen konnte die Steiermark optimal erfüllen, weil die demographischen Unterschiede, die Verfügbarkeit technischer und sozialer Infrastrukturen sowie der daraus abgeleitete Grad der Autoabhängigkeit über das gesamte Landesgebiet beträchtliche Unterschiede aufweisen. Mit der Hauptstadt Graz verfügt die Steiermark über eine Großstadt, die vielerorts eine ausgezeichnete Anbindung an den ÖV gewährleistet und das Aufsuchen bedeutender Einrichtungen des täglichen Bedarfs ohne PKW ermöglicht. Aber das Bundesland umfasst auch zahlreiche Klein- und Mittelstädte sowie ländlichen Siedlungsraum, dessen EinwohnerInnen aufgrund mangelhafter Erreichbarkeit des ÖV und der Daseinsvorsorge deutlich stärker vom eigenen Kraftfahrzeug abhängig sind. Darüber hinaus erwies sich als vorteilhaft, dass die Steiermark über alle benötigten Geodaten verfügt und diese auch unentgeltlich anbot. (vgl. MUNDT und AMANN 2019: 10, 30-34)

Um im Kontext des Untersuchungsgegenstandes die demographischen und infrastrukturellen Merkmale der Steiermark zu erfassen, sind nachfolgend drei Themenbereiche in wesentlichen Zügen vorgestellt: Das erste Subkapitel widmet sich der steirischen Bevölkerungsentwicklung und -verteilung in unterschiedlichen Maßstäben. Daran schließt das Subkapitel zur Verkehrsentwicklung- und Infrastruktur der Steiermark an, wobei insbesondere der MIV und ÖV im Fokus ist. Am Schluss lassen sich Merkmale zur steirischen Daseinsvorsorge nachlesen, welche in erster Linie die Bildungsinfrastruktur, die medizinische Infrastruktur sowie die Nahversorgung umfassen.

7.1. Bevölkerungsentwicklung und -verteilung

Die steirische Bevölkerung ist von 1.203.132 EinwohnerInnen im Jahr 2007 um 2,9 Prozent bzw. 34.935 Personen auf 1.238.067 EinwohnerInnen im Jahr 2017 angestiegen (vgl. Statistik Austria 2020). Sieht man sich diese Entwicklung auf Bezirksebene an, so machen sich signifikante Unterschiede bemerkbar (siehe Abb. 21): Während die Bezirke Graz (G) und Graz-Umgebung (GU) um mindestens fünf Prozent gewachsen sind, verzeichneten die Bezirke Murau (MU), Murtal (MT), Leoben (LE) sowie Bruck-Mürzzuschlag (BM) einen deutlichen Rückgang der Bevölkerung um mehr als drei Prozent. Die Bezirke Weiz (WZ) sowie Leibnitz (LB) waren durch schwächere Zuwächse von bis unter fünf Prozent gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu wurden in den restlichen Bezirken – Liezen (LI), Voitsberg (VO), Deutschlandsberg (DL), Hartberg-Fürstenfeld (HF) und Südoststeiermark (SO) – schwächere Abnahmen zwischen null und drei Prozent verzeichnet. (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2017b: 47)

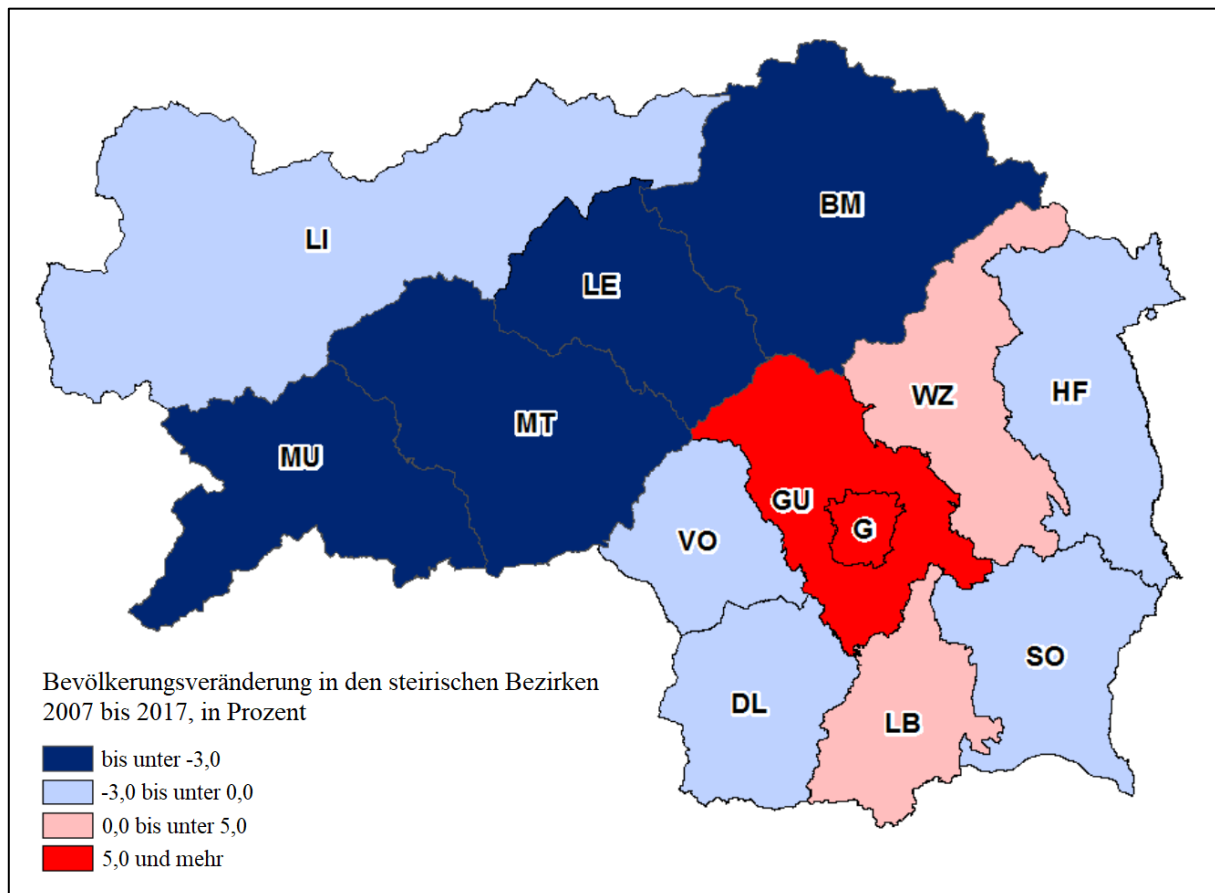


Abb. 21: Bevölkerungsveränderung in den steirischen Bezirken, 2007-2017 (Quelle: Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2017b: 47; veränderte Darstellung, 2020)

Die Regionalstatistik verweist auf eine massive Urbanisierung im Steirischen Zentralraum, wohingegen sich die Bevölkerung in den ländlichen Regionen erheblich ausdünn. Die Unterschiede kommen allerdings auf Gemeindeebene noch stärker zum Ausdruck: Bezogen auf den Zeitraum von 2007 bis 2017 zählten etwa Karlsdorf bei Graz mit plus 22 Prozent, Ludersdorf-Wilfersdorf mit plus 21 Prozent und Premstätten mit plus 20 Prozent zu jenen Gemeinden mit den höchsten Bevölkerungszunahmen. Demgegenüber stehen beispielsweise die Gemeinden Eisenerz mit minus 25 Prozent, Hohentauern mit minus 23 Prozent sowie Radmer mit minus 22 Prozent, welche allesamt zu jenen Gemeinden mit den stärksten Bevölkerungsrückgängen zählten. (vgl. MUNDT und AMANN 2019: 10)

Diese Entwicklungen verstärken die räumliche Disparität hinsichtlich der steirischen Bevölkerungsverteilung. Graz, die Mur-Mürz-Furche sowie der Siedlungsraum entlang der Enns sind durch höhere Bevölkerungsdichten charakterisiert. Doch insbesondere zwischen den Verdichtungsräumen in den Regionen Liezen, Obersteiermark West und Obersteiermark Ost verweisen geringe Bevölkerungsdichten auf periphere Strukturen. Diese Heterogenität in der Demographie der Steiermark wirkt sich auch auf das bestehende ÖV-Angebot aus: In vielen peripheren Gemeinden ist der ÖV primär auf den Schülerverkehr ausgelegt und bietet daher im Allgemeinen oftmals keine zufriedenstellenden Verbindungen und Intervalle. (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2017a: 32)

7.2. Verkehrsentwicklung und -infrastruktur

Auch im Verkehrswesen ist die Steiermark durch markante Entwicklungen charakterisiert: Ende 2014 überschritt der Bestand an Kraftfahrzeugen (KFZ) zum ersten Mal seit Beginn der Aufzeichnungen die Grenze von einer Million. Der größte je gemessene Jahreszuwachs ereignete sich mit 1,9 Prozent zwischen 2017 und 2018. Betrachtet man nur den Bestand der PKW, so wurde der bisherige Höchstwert mit 758.393 Autos Ende 2018 erreicht. Sowohl die KFZ- als auch die PKW-Dichte pro 1.000 EinwohnerInnen haben sich in der Steiermark in den vergangenen Jahren ebenfalls deutlich erhöht – im Jahr 2018 betrug dieser Wert 867,7 für KFZ bzw. 610,1 für PKW. In den Bezirken Südoststeiermark, Hartberg-Fürstenfeld, Deutschlandsberg, Weiz und Leibnitz kommt mittlerweile auf jeden Einwohner bzw. jede Einwohnerin mindestens ein PKW. Die beachtliche Menge an Autos spiegelt sich auch in der Verkehrsinfrastruktur wider: Das ländliche Straßennetz der Steiermark nimmt ein Drittel des entsprechenden gesamtösterreichischen Netzes ein (vgl. BERNHARD 2016: 230). Das steirische Autobahn- und Schnellstraßennetz umfasst aktuell mehr als 460.000 km, was mehr als ein Fünftel des hochrangigen Straßennetzes in Österreich ausmacht. (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2019: 8, 16)

Im Gegensatz zur Infrastruktur des MIV weist die Steiermark im ÖV vor allem im ländlichen Raum deutliche Defizite auf: Fast ein Drittel der steirischen Bevölkerung verfügt über keinen qualitativen, fußläufigen Zugang zu Haltestellen und sogar sechs Prozent der EinwohnerInnen wohnen von Haltestellen weiter als 1.000 m (Luftlinie) entfernt (siehe Abb. 22). Hinzu kommt, dass ein großer Anteil der Haltestellen, welche eine gute Anbindung für FußgängerInnen aufweisen, durch geringe Bedienungshäufigkeiten gekennzeichnet sind und infolgedessen keinen attraktiven ÖV anbieten können. (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2017a: 32)

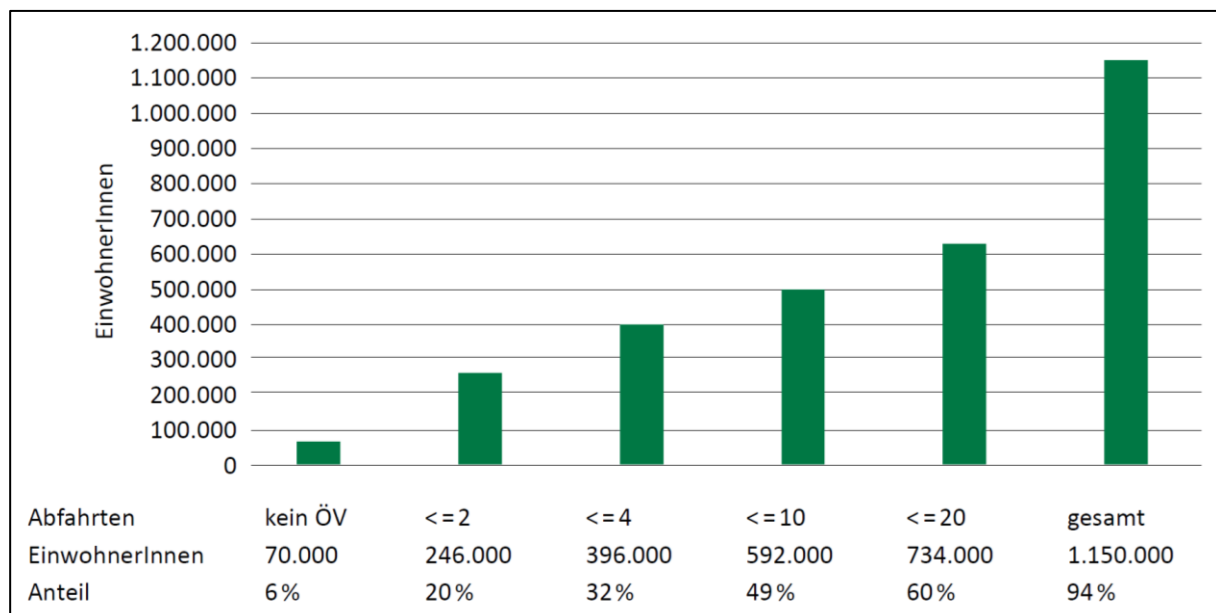


Abb. 22: Erreichbarkeit von ÖV-Haltestellen für die steirische Bevölkerung, klassifiziert nach der Anzahl täglicher Abfahrten je Haltestelle, wobei der Haltestelleneinzugsbereich einem Radius von 1.000 Metern entspricht (Quelle: Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2017a: 33)

Trotz mangelhafter ÖV-Erschließung in vielen Teilen der Steiermark zeichnet sich durch den kontinuierlichen Autozuwachs ein widersprüchlicher Trend im Mobilitätsverhalten der Bevölkerung ab. Denn die Steirische Landesregierung ergreift bereits seit Jahren umfassende Maßnahmen zum Ausbau sowie zur Taktverdichtung des ÖV, die insbesondere im ländlichen Raum zu tragen kommen (vgl. MUNDT und AMANN 2019: 30). Die Verbesserung des ÖV bei gleichzeitiger Intensivierung des MIV unterstreicht die Notwendigkeit einer netzwerkbasierter Verkehrsemissionssteuer, welche für PKW-Haushalte in fußläufiger Nähe zu Haltestellen mit guter Bedienungsqualität entsprechend höher ausfallen muss.

7.3. Daseinsvorsorge

Die Daseinsvorsorge unterliegt unterschiedlichen Definitionen, umfasst aber im Wesentlichen personen- und haushaltsbezogene Bereiche des täglichen Bedarfs. Hierzu zählen beispielsweise Bildungseinrichtungen, medizinische Grundversorgung, Betreuungsstätten, Nahversorgung, Postdienste und Freizeiteinrichtungen. Hinsichtlich ihrer verkehrlichen Erschließung zeichnete sich in den vergangenen Dekaden ein starker Trend hin zur Erreichbarkeit für motorisierte Fahrzeuge ab. (vgl. Bundesanstalt für Bergbauernfragen 2015: 20)

In der Steiermark wurden in den letzten Jahren langfristige Veränderungen in der Bildungsinfrastruktur eingeleitet, die teilweise mit zahlreichen Schulschließungen einhergingen (vgl. KROISMAYR et al. 2016: 140). So mussten etwa im Jahr 2012 infolge des „Regionalen Bildungsplans für die Steiermark“ die Volksschulen ihren Lehrbetrieb in 23 Gemeinden dauerhaft einstellen (vgl. KROISMAYR et al. 2016: 140). Solche Entwicklungen wirken sich auch negativ auf die Schülerpendelwanderungen aus, die in den steirischen Stadtumlandbezirken neben jenen in Kärnten und Teilen Niederösterreichs am größten in ganz Österreich sind (vgl. MACHOLD 2010: 104).

Trotz einiger Versorgungsdefizite in ländlichen Gebieten gilt die medizinische Infrastruktur räumlich als relativ ausgewogen. Niedergelassene Ärzte lassen sich häufiger in urbanen Zentren vorfinden, während die Ärztedichte am Land deutlich geringer ausfällt – in Anbetracht der unterschiedlichen Bevölkerungsdichten ist dieser Gegensatz jedoch im Allgemeinen nicht sonderlich überraschend. Die einzigen Problemregionen befinden sich in der Obersteiermark, wo man mit dem PKW mehr als 30 Minuten Fahrzeit zum nächstgelegenen Akutkrankenhaus benötigt. (vgl. MACHOLD und TAMME 2009: 164)

Auch im Bereich der Nahversorgung lässt sich ein starker Kontrast zwischen Stadt und Land feststellen, der jedoch kritischer ausfällt als bei der Gesundheitsversorgung. Der Einzelhandel samt Lebensmittelgeschäften weist seit geraumer Zeit intensive Konzentrationserscheinungen auf. Während sich Einkaufs- und Handelszentren an wichtigen Verkehrsknotenpunkten am Rande städtischer Zentren ballen, ziehen sich immer mehr Einzelhandelsunternehmen aus Ortskernen und ländlichen Gemeinden zurück. Von 542 im Jahr 2011 untersuchten Gemeinden in der Steiermark mussten 221 von ihnen ohne Supermarkt auskommen, was 40 Prozent und somit den größten Anteil unter allen untersuchten Bundesländern Österreichs ausmachte. Durch diese gegensätzlichen Erreichbarkeitsverhältnisse ergeben sich entsprechend differenzierte Bemessungen der netzwerkbasierter Verkehrsemissionssteuer. (vgl. Bundesanstalt für Bergbauernfragen 2015: 21)

8. Technische Ressourcen

Die technischen Ressourcen, welche für den empirischen Teil der Arbeit herangezogen wurden, lassen sich in zwei grobe Bestandteile gliedern: Sämtliche Berechnungen und Analysen wurden in der GIS-Softwareumgebung „ArcGIS Pro“ durchgeführt. Die dort enthaltenen Komponenten „Network Analyst“ und „ModelBuilder“ trugen essenziell zur Beantwortung der Forschungsfragen bei. Anschließend sind alle verwendeten Datensätze samt ihren wichtigsten Eigenschaften angeführt.

8.1. Software

Im Zentrum der Untersuchungen steht die GIS-Netzwerkanalyse, welche mit der Extension „Network Analyst“ von ArcGIS Pro der Firma ESRI Inc. (Environmental Systems Research Institute) durchgeführt wurde. Auch die Vorbereitung, Klassifizierung, Gewichtung, Verschneidung und kartographische Aufbereitung der Datensätze erfolgte mit dieser Geoinformationssoftware. Die Gründe für die Wahl von ArcGIS Pro und dessen Extension sind vielfältig: Am entscheidendsten ist, dass dieses GIS alle notwendigen Funktionalitäten für die Berechnung einer netzwerkbasierter Verkehrsemissionssteuer zur Verfügung stellt. Dazu zählen einerseits die Geoverarbeitungswerkzeuge für die Netzwerkanalyse, wie z. B. die Erstellung eines topologisch korrekten Network Datasets, in welchem alle erforderlichen Routingparameter festgelegt werden (vgl. ESRI 2020a). Auch die Einzugsgebietlayer können hinsichtlich ihrer Parameter individuell angepasst werden – etwa zur Festlegung der Distanzintervalle pro Einrichtungstyp (vgl. ESRI 2020a). Andererseits lassen sich die Geodaten optimal für die Netzwerkanalyse vorbereiten und im Sinne einer geeigneten Darstellung der Ergebnisse nachbereiten. Auch der Umstand ist nicht zu vernachlässigen, dass die Analysen für ihren Einsatz auf behördlicher bzw. planerischer Ebene vorgesehen sind. Dies setzt voraus, dass die dafür herangezogene Software langfristige Stabilität und technischen Support gewährleisten muss, was bei Open-Source-Software im Vergleich zu ArcGIS Pro deutlich schlechter ausfällt. Hinzu kommt, dass bei Letzterem die Automatisierung der Prozessabfolge dank des leistungsstarken ModelBuilders eine geringe Störanfälligkeit aufweist. Schließlich ist an dieser Stelle auch anzumerken, dass ArcGIS mittlerweile über eine beachtlich große User-Community verfügt, mit welcher sich der bzw. die NutzerIn in diversen Problemsituationen Abhilfe schaffen kann.

Da der Network Analyst speziell für Netzwerkanalysen konzipiert wurde und diesbezüglich über einen beachtlichen Funktionsumfang verfügt, hat sich sein Einsatz bereits in zahlreichen Forschungs- bzw. Masterarbeiten bewährt. Vom Erstellen eines multimodalen Network Datasets und raschen Finden der optimalen Route bis hin zu mehrschichtigen Einzugsgebietsanalysen und komplexen Berechnungen von Start-Ziel-Kostenmatrizen bietet diese Erweiterung alle Erfordernisse zur Lösung erreichbarkeitsbezogener Fragestellungen (vgl. ESRI 2020a). In Kapitel „5.3. GIS-Netzwerkanalyse“ wurden die wichtigsten Werkzeuge bzw. Analysevarianten vorgestellt, um eine überblicksmäßige Vorstellung von den Funktionen und Anwendungsbereichen zu erhalten.

8.2. Datensätze

Im Zuge der Netzwerkanalysen der vorliegenden Masterarbeit wurden große Mengen an Geodaten verarbeitet. Um räumlich differenzierte Aussagen über die Höhe der Verkehrsemissionssteuer treffen zu können, mussten im Untersuchungsgebiet – das immerhin der gesamten Steiermark entspricht – sämtliche Haltestellen und Linien des ÖV sowie Einrichtungen des täglichen Bedarfs erfasst, vorbereitet, analysiert und kartographisch nachbereitet werden. Auch das zugrundeliegende Straßen- und Wegenetz musste einigen Verarbeitungsprozessen unterzogen werden, um auf dessen Basis fußgängertaugliche Erreichbarkeitsberechnungen durchführen zu können. Außerdem war es auch erforderlich, die Daten auf das Landesgebiet der Steiermark zu beschränken, weshalb die entsprechende Verwaltungsgrenze als räumlicher Rahmen diente. In Summe umfassten alle Datensätze zum Zeitpunkt ihres Bezuges 1.854.211 Features, welche in weiterer Folge verschiedenste Geoverarbeitungswerkzeuge durchlaufen und sich letztendlich auf 154.222 Stück reduziert haben. In Anbetracht dieser beachtlichen Menge an verarbeiteten Features, aber auch des hohen Qualitätsanspruchs war eine sorgfältige Wahl der Geodaten unerlässlich.

Nachfolgend werden in Tabelle 5 die wichtigsten Informationen zu allen Datensätzen gezeigt, die für den praktischen Teil der Masterarbeit herangezogen wurden. Dabei beziehen sich die Angaben ausschließlich auf Quelldatensätze, welche noch keinerlei Bearbeitungsschritten im Rahmen der Masterarbeit unterzogen wurden.

Datensatz	Quelle	Dateiformat	Zeitlicher Stand	Räumliche Ausdehnung
ÖV-Haltestellen	Verkehrsverbund Steiermark	Shapefile	April 2020	Steiermark
ÖV-Linien	Verkehrsverbund Steiermark	Shapefile	April 2020	Steiermark
Niedergelassene Ärzte	Geoinformationsabteilung Land Steiermark	Shapefile	August 2019	Steiermark
Apotheken	Geoinformationsabteilung Land Steiermark	Shapefile	August 2018	Steiermark
Bildungsstandorte	Geoinformationsabteilung Land Steiermark	Shapefile	Dezember 2018	Steiermark
Points of Interest (Punktfeatures)	OpenStreetMap	Shapefile	Mai 2020	Österreich
Points of Interest (Polygonfeatures)	OpenStreetMap	Shapefile	Mai 2020	Österreich
Verkehrsgraph	Österreichisches Institut für Verkehrsdateninfrastruktur (ÖVDAT)	SQLite Database Feature Class in einem GeoPackage	Dezember 2019	Österreich
Verwaltungsgrenzen	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen	Shapefile	April 2019	Österreich

Tab. 5: Übersicht über sämtliche in der Masterarbeit herangezogenen Quelldatensätze (eigene Darstellung, 2020)

Die ÖV-Datensätze konnten im benötigten Umfang sowie in der geforderten Qualität und Aktualität ausschließlich vom Verkehrsverbund Steiermark zur Verfügung gestellt werden. Mit

Letzteren gab es telefonisch und per E-Mail mehrere Absprachen, um detaillierte Auskunft über die korrekte Interpretation und Verwendung der Feature-Attribute zu erhalten. Die Datensätze zu den niedergelassenen Ärzten, Apotheken und Bildungsstandorten wurden von der Geoinformationsabteilung des Landes Steiermark bezogen, da sie ebenfalls den technischen und inhaltlichen Anforderungen der Masterarbeit (siehe Kap. „7. Untersuchungsgebiet Steiermark“) genügten. Die Supermärkte mussten als vierter und somit letzter Einrichtungstyp der analysierten Daseinsvorsorge von OpenStreetMap über den Downloadserver der Geofabrik (<https://download.geofabrik.de/europe/austria.html>; zuletzt abgerufen am 13.10.2020) bezogen werden, da sich keine kostenfreie und derart umfangreiche Alternative anbot. Zahlreiche stichprobenartige Überprüfungen legten nahe, dass diese Geodaten in Bezug auf Vollständigkeit, Aktualität und Genauigkeit hohen Standards entsprechen. Dies wurde auch in der wissenschaftlichen Publikation, auf welche in Kapitel „6.2. Wahl der geeigneten Datengrundlage“ ausführlich eingegangen wurde, bestätigt. Da sich die Supermärkte in zwei übergreifenden Datensätzen (Points of Interest in Punkt- und Polygoneometrie) befanden, mussten sie im Zuge ihrer Vorbereitung mit Geoverarbeitungswerkzeugen extrahiert werden. Der Verkehrsgraph, welcher als Grundlage für die Netzwerkanalysen herangezogen wurde, stammt von der GIP, die vom Österreichischen Institut für Verkehrsdateninfrastruktur (ÖV DAT) betrieben wird. Dieser Anbieter arbeitet eng mit österreichischen Behörden sowie der österreichischen Verwaltung zusammen und stellt daher ein äußerst zuverlässiges Straßen- und Wegenetz flächendeckend für das gesamte Bundesgebiet Österreichs zur Verfügung. Die Verwaltungsgrenzen vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) erfüllen ihren Zweck als räumlich exakte Definition der österreichischen Gebietskörperschaften auf verschiedenen hierarchischen Stufen, weshalb sie sich zur Abgrenzung des steirischen Landesgebiet hervorragend eigneten.

9. Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer

Dieses Kapitel beschreibt die praktische Ausarbeitung der Masterarbeit und liefert Antworten auf die im Einleitungsteil erläuterten Forschungsfragen. Bevor auf die konkrete Umsetzung eingegangen wird, soll der nachfolgend abgebildete Workflow den gesamten Arbeitsvorgang in seinen wesentlichen Grundzügen schematisch veranschaulichen (siehe Abb. 23). Während die Datensätze farblich unterteilt sind (ÖV-Haltestellen in Blau, Daseinsvorsorge in Gelb, sonstige Datensätze in Grün), sind die Prozesse als graue Rechtecke symbolisiert.

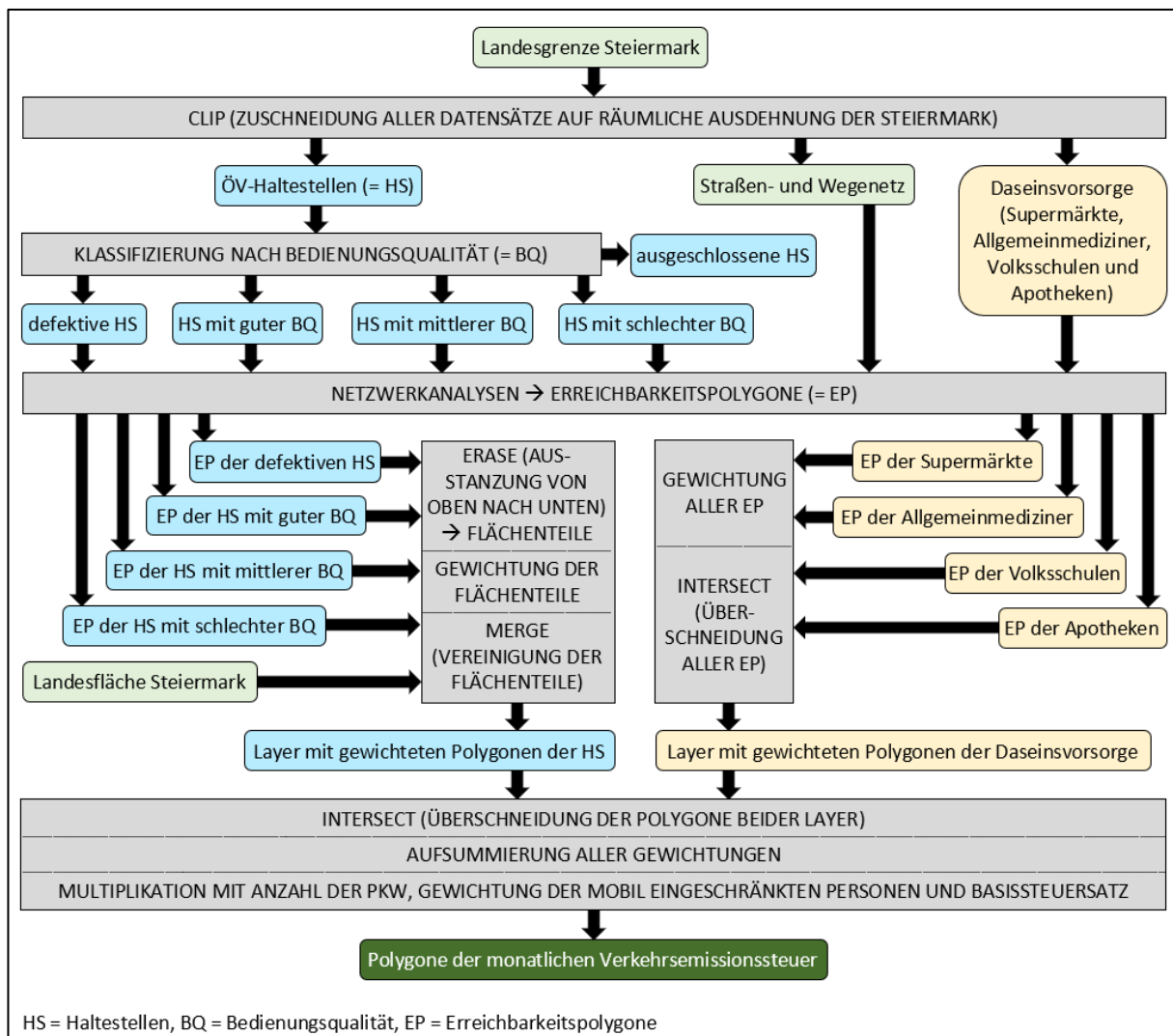


Abb. 23: Workflow der praktischen Ausarbeitung (eigene Darstellung, 2021)

Nach der Zuschneidung aller Datensätze auf die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebiets wurden diese für die Analysen vorbereitet. Darin inbegriffen war – neben der Aufbereitung der Daseinsvorsorge sowie des Straßen- und Wegenetzes – die Klassifizierung der ÖV-Haltestellen nach ihrer Bedienungshäufigkeit (durchschnittliche Abfahrten pro Tag), woraus vier Klassen resultierten: Die defektiven (mit Unsicherheit behafteten) Haltestellen sowie die Haltestellen mit guter, mittlerer und schlechter Bedienungsqualität wurden für die weitere Bearbeitung herangezogen. Alle restlichen Haltestellen wurden ausgeschlossen, da sie die erforderliche Aufnahmegrenze von 13

Abfahrten pro Tag unterschritten. Anschließend erfolgten die Netzwerkanalysen, welche je Datensatz entsprechende Erreichbarkeitspolygone lieferten. Letztere wurden in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit mit spezifischen Gewichtungswerten versehen und zusammengefügt bzw. miteinander überschritten, sodass danach für die Haltestellen und Daseinsvorsorge jeweils ein Layer mit gewichteten Polygonen zur Verfügung stand. Nach deren Überschneidung und Gewichtungsaddition wurden ihre aufsummierten Gewichtungswerte mit einigen Faktoren (Anzahl der PKW, Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen und Basissteuersatz) multipliziert, um am Ende die Polygone der monatlichen Verkehrsemissionssteuer zu erhalten.

Dieser Workflow wurde vollständig in einem GIS implementiert. Sämtliche Abläufe sind zur besseren Verständlichkeit in vier aufeinanderfolgende Prozessphasen unterteilt, die ihrerseits wiederum eine Gliederung in Blöcke aus Haupt- und Subprozessen aufweisen. Sie wurden mit dem ModelBuilder realisiert, weil dadurch alle Daten, Verarbeitungsschritte und Einstellungen so strukturiert werden konnten, dass sie nachvollziehbar sowie jederzeit änderbar sind. Zu den Abläufen wurden Screenshots erstellt, um die technischen Erläuterungen grafisch zu veranschaulichen. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass viele Geoverarbeitungsprozesse im Laufe der praktischen Ausarbeitung mit sehr ähnlichen Einstellungen wiederholt werden mussten und daher ursprünglich zahlreiche Screenshots redundante Informationen enthielten. Aus diesem Grund sind in der nachfolgenden Dokumentation ausschließlich jene Screenshots eingebaut, welche entweder die erstmalige Anwendung oder bedeutende Parameterveränderungen eines Werkzeugs zeigen. Die theoretische Basis, auf welche im Laufe der Dokumentation immer wieder Bezug genommen wird, wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln der Masterarbeit ausführlich behandelt.

Das Modell in Abbildung 24 stellt die vier Prozessphasen (farbige Differenzierung der Umrandungen) sowie alle Haupt- und Subprozesse samt den verwendeten Daten dar.

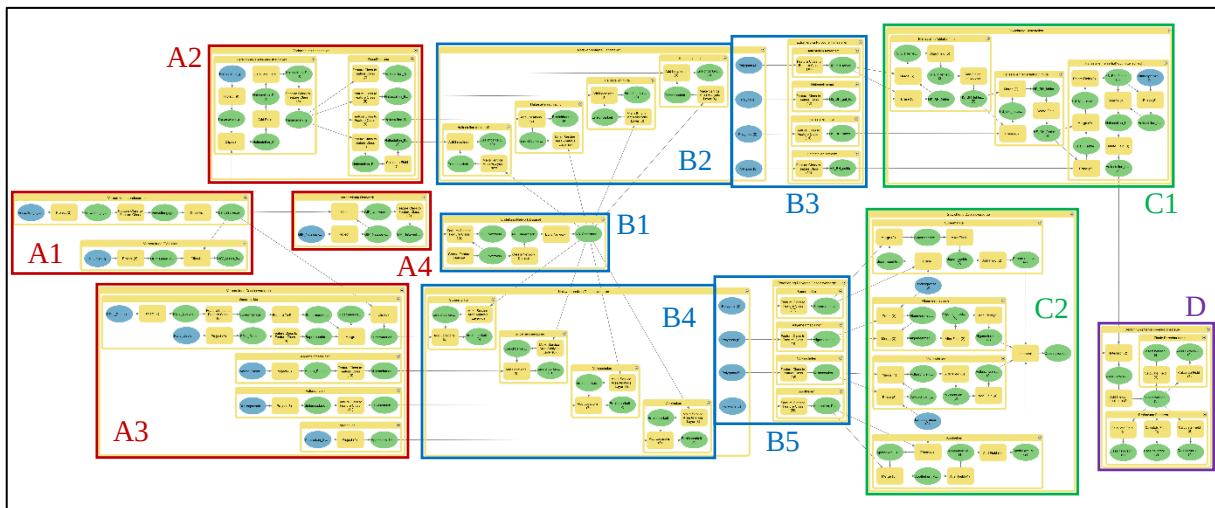


Abb. 24: Vollständiges Modell aus dem ArcGIS Pro ModelBuilder, nach Prozessphasen klassifiziert (eigene Darstellung, 2020)

Die vier Prozessphasen umfassen die Vorbereitungen (Phase A, in Rot), Netzwerkanalysen (Phase B, in Blau), Gewichtungen (Phase C, in Grün) sowie Berechnungen der Verkehrsemissionssteuer (Phase D, in Violett), nach deren Schema auch die Gliederung der anschließenden Subkapiteln erfolgte. Aufgrund des großen Modellumfangs wurden die Phasen A bis C jeweils in mehrere Blöcke aufgeteilt und durchnummeriert (z. B. A1, A2, A3 und A4).

Diese lassen sich in vergrößerter Form an entsprechender Stelle in der Dokumentation wiederfinden, sodass sie besser lesbar sind als in obiger Abbildung, die lediglich einen gesamtheitlichen Überblick vermitteln soll. Innerhalb der Prozessphasen bzw. ihrer nummerierten Blöcke befinden sich die einzelnen Haupt- und Subprozesse, welche im Modell durch gelbe Kästchen charakterisiert sind. Während die blauen Ovale die importierten Ausgangsdaten darstellen, werden bereits verarbeitete Datensätze als grüne Ovale visualisiert. Die grauen Pfeile verdeutlichen die Richtung bzw. Reihenfolge der Verarbeitungsschritte.

Der Aufbau dieses Kapitels entspricht in chronologischer Reihenfolge den einzelnen Blöcken und Prozessabläufen: Zuerst sind die Vorbereitungen der Landesgrenze und ÖV-Linien, der Haltestellen, der Daseinsvorsorge sowie des Straßen- und Wegenetzes erläutert. Danach lässt sich die Dokumentation der Netzwerkanalysen vorfinden, welche sowohl das Network Dataset als auch die Analysen und Extraktionen der Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge umfasst. Anschließend sind die letzteren zwei Objektgruppen in Bezug auf ihre Gewichtungsvorgänge beschrieben. Am Ende sind die Subkapitel zur finalen Steuerberechnung sowie zur Automatisierung der Prozessabläufe dargelegt.

9.1. Vorbereitungen

9.1.1. Landesgrenze und ÖV-Linien

Zu Beginn aller Vorbereitungen musste aus den Verwaltungsgrenzen Österreichs die steirische Landesgrenze als Polygon extrahiert werden, um quasi als räumliche Schablone für alle weiteren Geodaten zu dienen. Daher wurden zunächst die Verwaltungsgrenzen vom BEV mit 7.850 Features in das Modell importiert (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung Landesgrenze“).

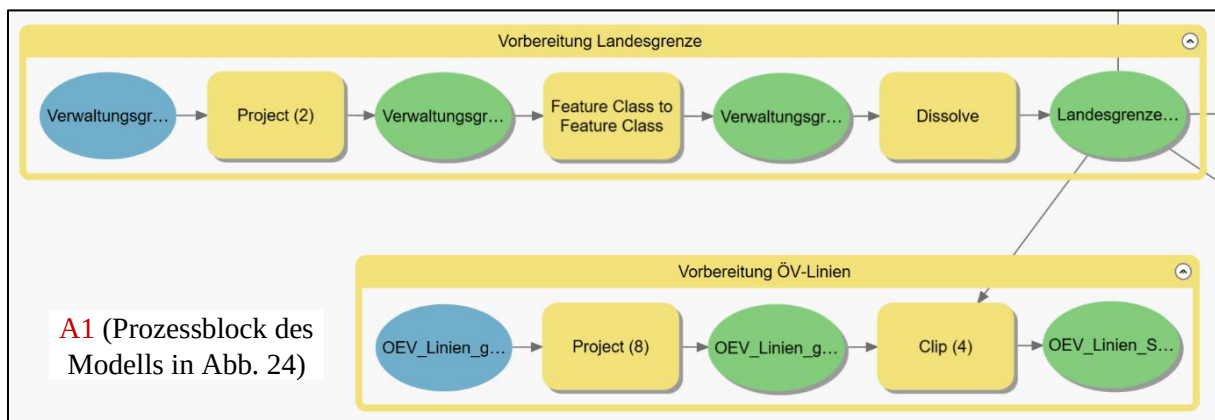


Abb. 25: Vorbereitung der Landesgrenze und ÖV-Linien in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Damit alle Datensätze einen einheitlichen Raumbezug aufweisen und auf der Hintergrundkarte lagekorrekt zueinander positioniert sind, war es erforderlich, die Verwaltungsgrenzen mit einem entsprechenden Geoverarbeitungswerkzeug an die Projektion der Basemap anzupassen. Dies erfolgte mit dem Tool „Project“ (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung Landesgrenze“). Im zugehörigen Einstellungsfenster mussten neben der Bezeichnung und dem Speicherort der Input- bzw. Outputdatei auch das gewünschte Koordinatensystem sowie die Transformationsparameter festgelegt werden (siehe Abb. 26, linkes Fenster).

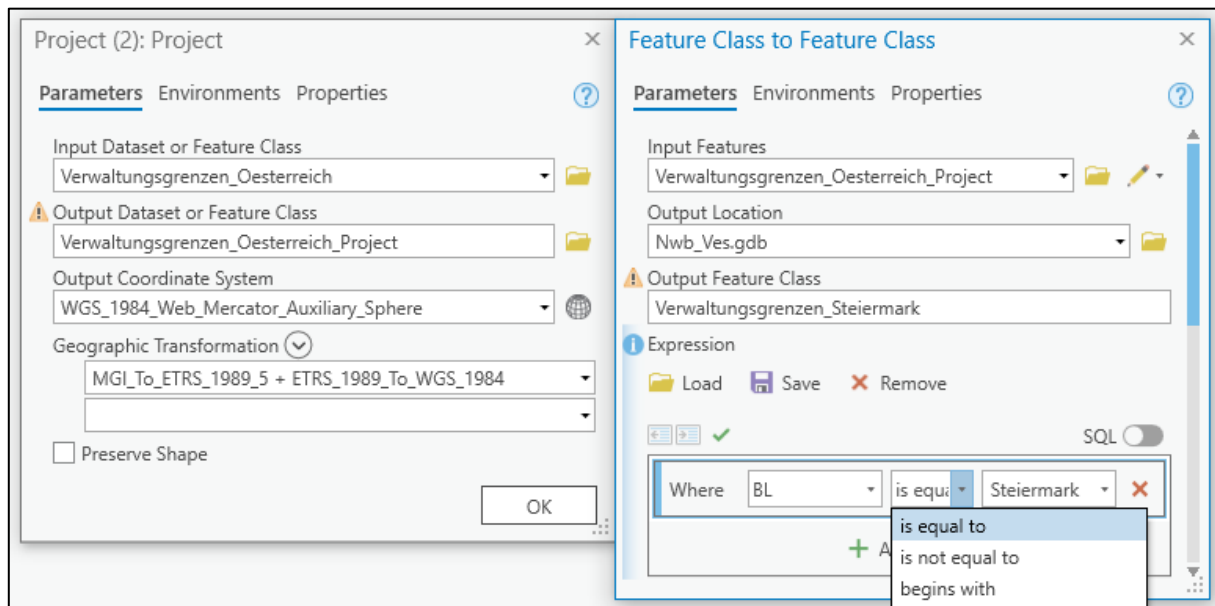


Abb. 26: Einstellungsfenster der Tools „Project“ und „Feature Class to Feature Class“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Anschließend wurde die steirische Landesgrenze aus den projizierten Verwaltungsgrenzen mittels des Tools „Feature Class to Feature Class“ extrahiert (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung Landesgrenze“). Im zugehörigen Einstellungsfenster waren folgende Parameter festzulegen (siehe Abb. 26, rechtes Fenster): Neben den allgemeinen Datenspezifikationen wurde eine Bedingung eingerichtet, die den gewünschten Teil des Datensatzes sucht bzw. selektiert. Dabei sollten nur jene Features herausgefiltert werden, welche den Wert „Steiermark“ im Attribut „BL“ (Bundesland) aufweisen („is equal to“).

Da die steirische Landesgrenze in mehreren Teilen extrahiert wurde, mussten diese mit dem Tool „Dissolve“ zusammengeführt werden (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung Landesgrenze“). Dabei wurden die Werte des Attributs „BL“ (Bundesland) ausgewählt, auf deren Basis die Zusammenführung vorstattgehen sollte (siehe Abb. 27, linkes Fenster). Die Erzeugung eines

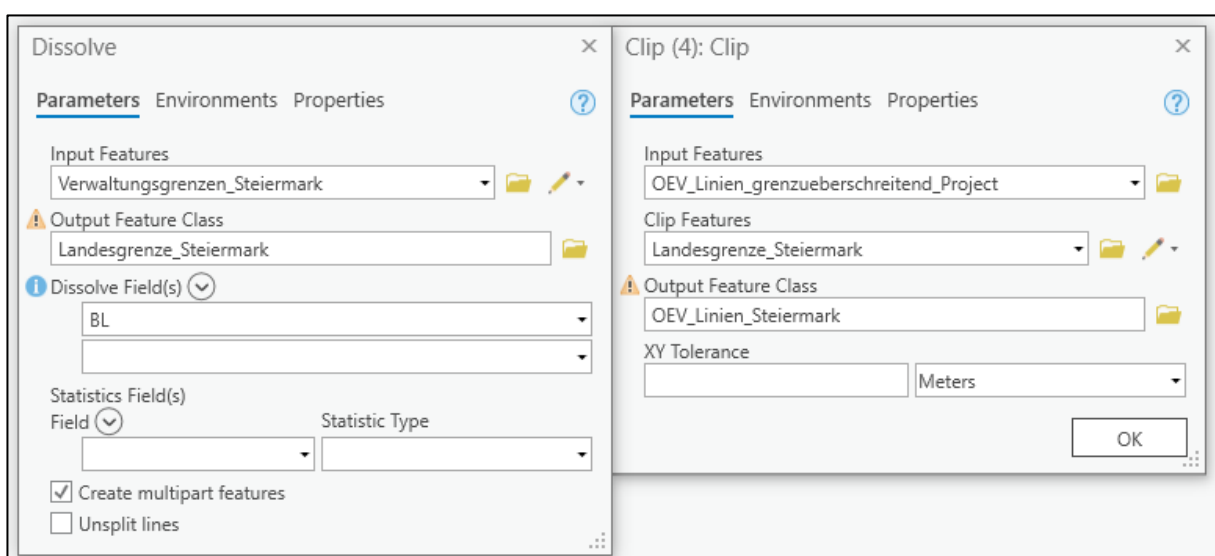


Abb. 27: Einstellungsfenster der Tools „Dissolve“ und „Clip“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Multipart Feature stellt sicher, dass räumlich getrennte Features operativ behandelt werden wie ein einheitliches. Die Vorbereitung der Landesgrenze war somit abgeschlossen (siehe Abb. 28).

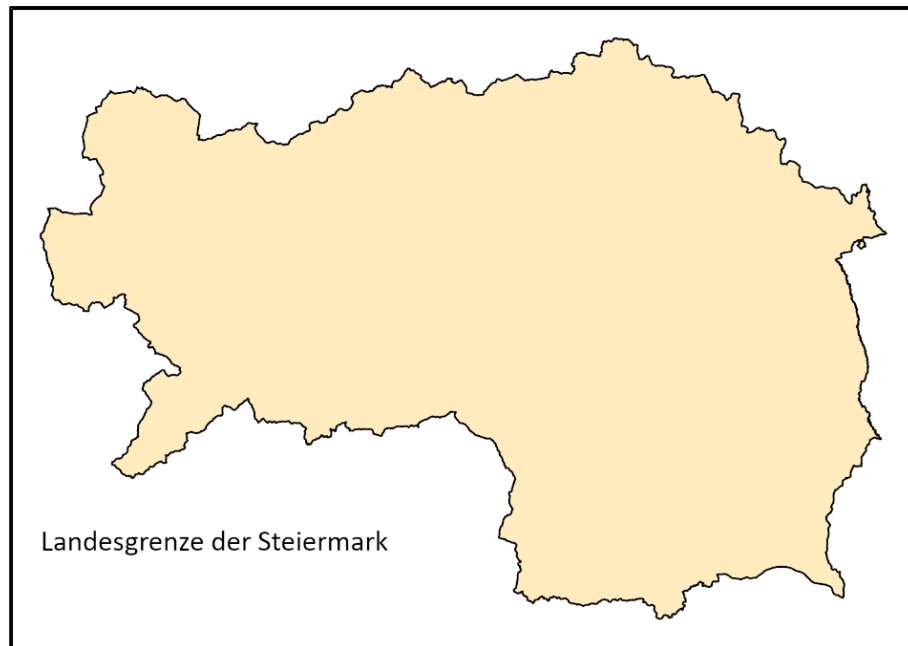


Abb. 28: Landesgrenze der Steiermark (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

Danach wurden die ÖV-Linien des Verkehrsverbundes Steiermark mit insgesamt 1.163 Features in das Modell importiert (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung ÖV-Linien“). Sie sind der einzige Datensatz, der keinen funktionalen oder kartografischen Zweck erfüllte. Trotzdem wurden die ÖV-Linien integriert, damit sie gegebenenfalls die Verständlichkeit der Ergebniskarten unterstützen konnten. Im Nachhinein stellte sich jedoch heraus, dass Letztere bereits eine Fülle an Informationen enthielten und die ÖV-Linien ohnehin keine zusätzliche Aussagekraft im Kontext der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer geliefert hätten.

Nach ihrer Projektion (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung ÖV-Linien“), wie sie schon auf gleiche Weise mit dem Datensatz zuvor durchgeführt wurde, mussten die ÖV-Linien noch auf das Untersuchungsgebiet zurechtgestutzt werden. Dazu wurde das Tool „Clip“ eingesetzt (siehe Abb. 25, Box „Vorbereitung ÖV-Linien“): Im zugehörigen Einstellungsfenster wurden die ÖV-Linien als Input Features und die steirische Landesgrenze als Clip Feature ausgewählt (siehe Abb. 27, rechtes Fenster). Die Vorbereitung der ÖV-Linien war somit ebenfalls abgeschlossen.

9.1.2. ÖV-Haltestellen

Die Haltestellen wurden wie die ÖV-Linien vom Verkehrsverbund Steiermark bereitgestellt und mit insgesamt 8.729 Features in das Modell importiert (siehe Abb. 29, Box „Berechnung Bedienungshäufigkeit“). In Abbildung 29 ist auch ersichtlich, dass die Verarbeitungsprozesse der Haltestellen in zwei größere Schritte zusammengefasst sind: Im ersten Schritt wurde die Bedienungshäufigkeit der Haltestellen berechnet, anhand derer die Angebotsqualität gemessen werden kann. In diesem Zusammenhang wird eine der Forschungsfragen dahingehend beantwortet, wie sich das zeitliche Angebot des öffentlichen Verkehrs in messbare Größen

transformieren lässt. Im zweiten Schritt wurden die Haltestellen entsprechend ihrer Bedienungshäufigkeit – ausgedrückt in durchschnittlichen Abfahrten pro Tag – klassifiziert, um in weiterer Folge für jede gebildete Klasse eine Erreichbarkeitsanalyse durchzuführen. Die theoretischen Grundlagen hierfür lassen sich in Kapitel „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ sowie Kapitel „6.4. Klassifizierung der Haltestellen des ÖV“ nachlesen. Auch hier wird auf eine der Forschungsfragen eingegangen, die sich mit der Integration geeigneter Parameter in der Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer befasst.

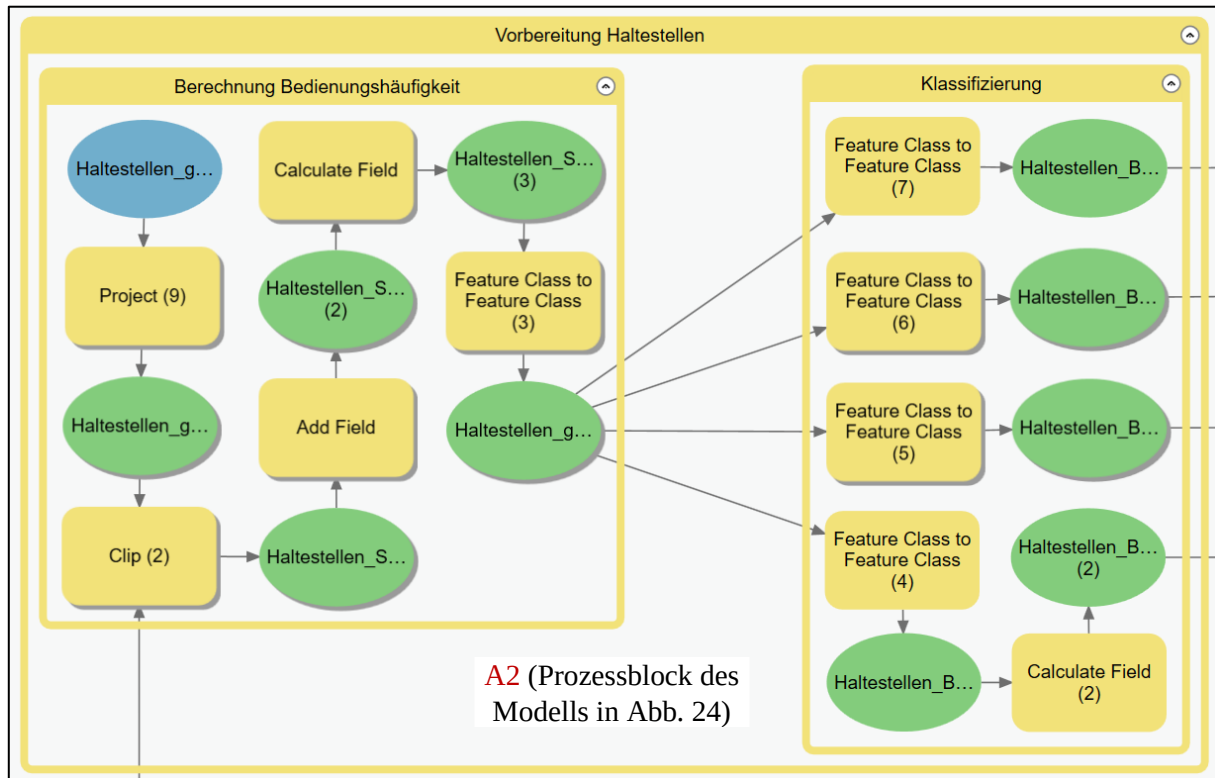


Abb. 29: Vorbereitung der Haltestellen in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Nach ihrer Projektion sowie ihrem Zuschnitt (siehe Abb. 29, Box „Berechnung Bedienungshäufigkeit“), wie sie schon auf gleiche Weise mit den Datensätzen zuvor durchgeführt wurden, erfolgte die Ergänzung der Haltestellendaten um ein neues Attribut: „Abfahrten_Tag“ wurde als neues Datenfeld mittels „Add Field“ in den Datensatz hinzugefügt (siehe Abb. 29, Box „Berechnung Bedienungshäufigkeit“). Im linken Fenster der Abbildung 30 ist ersichtlich, dass hier der Datentyp „Double“ für Gleitkommazahlen eingestellt wurde. Des Weiteren wurde mit einem Häkchen die Erlaubnis zur Bildung von Nullwerten erteilt, damit auch das Fehlen eines Wertes unter diesem Attribut zulässig ist. Anschließend erfolgte die Berechnung der Bedienungshäufigkeit (Abfahrten pro Tag) anhand des Geoverarbeitungswerkzeugs „Calculate Field“ (siehe Abb. 29, Box „Berechnung Bedienungshäufigkeit“). Das rechte Fenster der Abbildung 30 gibt Aufschluss über die Rechenoperation mit ihren einzelnen Komponenten: Es wurden die Abfahrten an Schultagen von Montag bis Freitag („MoFr_S“), an Ferientagen von Montag bis Freitag („MoFr_F“), an Schulsamstagen („Sa_Schule“), an Feriensamstagen („Sa_Ferien“) sowie an Sonn- und Feiertagen („SoFei“) auf das ganze Jahr hochgerechnet, wobei 2020 als Bezugsjahr diente, da der Haltestellendatensatz ebenfalls aus diesem Jahr stammt. Dann wurde die Summe aller

hochgerechneten Tagesanzahlen durch 366 (2020 war ein Schaltjahr) dividiert, um den Tagesdurchschnitt an Abfahrten zu ermitteln. Letzterer wurde dann im zuvor erstellten Attribut „Abfahrten_Tag“ für jedes Feature des Haltestellendatensatzes gespeichert.

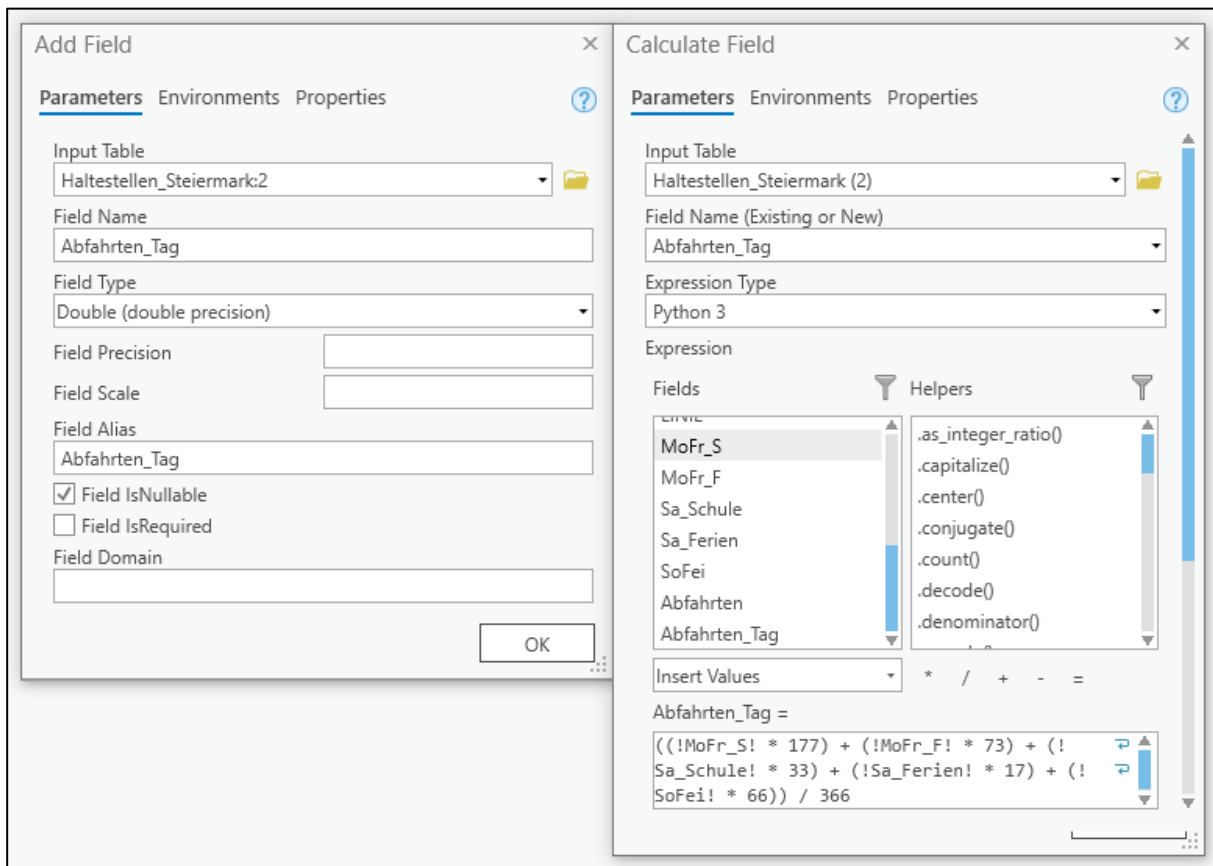


Abb. 30: Einstellungsfenster der Tools „Add Field“ und „Calculate Field“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Zwischen der Berechnung der Bedienungshäufigkeit und der Klassifizierung der Haltestellen musste ein bestimmter Teil des Haltestellendatensatzes entfernt werden. Hierbei handelte es sich um all jene Haltestellen, welche nur 13 oder weniger Abfahrten pro Tag aufweisen. Denn wie in Kapitel „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ bereits dargelegt wurde, gehen so geringe Bedienungshäufigkeiten mit einer sehr hohen Autoabhängigkeit einher, weshalb die betroffenen Haltestellen für die später durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen keine Rolle spielten. Schließlich sollte die netzwerkbasierte Verkehrsemissionssteuer nur für diejenigen Regionen zu tragen kommen, die über eine zumutbare öffentliche Verkehrsanbindung und/oder Versorgung mit Einrichtungen des täglichen Bedarfs verfügen. Da es jedoch vorkommen kann, dass auch diese ausgeschlossenen Haltestellenbereiche einer Besteuerung unterzogen werden (weil sie sich in fußläufiger Nähe zu Haltestellen mit höherer Bedienungshäufigkeit und/oder Einrichtungen des täglichen Bedarfs befinden), mussten diese übriggebliebenen „Restflächen“ wie alle anderen mit einer entsprechenden Gewichtung (in diesem Fall 0) versehen werden. Auf diese Weise konnten sie ebenfalls in die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer integriert werden, worauf an späterer Stelle in der Dokumentation noch genauer eingegangen wird. (Anmerkung: Es durften nur Entfernungen bezogen auf den Fußverkehr berücksichtigt werden, da nicht davon auszugehen ist, dass alle VerkehrsteilnehmerInnen ein Fahrrad besitzen bzw. benützen können.)

Der Ausschluss jener Haltestellen mit einer Bedienungshäufigkeit von maximal 13 Abfahrten pro Tag erfolgte mithilfe des Tools „Feature Class to Feature Class“ (siehe Abb. 29, Box „Berechnung Bedienungshäufigkeit“). Die jeweiligen Einstellungen dafür sind im linken Fenster der Abbildung 31 einsehbar. Hier wurde mit einer Bedingung festgelegt, dass lediglich die Haltestellen mit einer Bedienungshäufigkeit („Abfahrten_Tag“) von mehr als 13 („is greater than 13“) für die weiteren Bearbeitungsschritte herausgefiltert werden.

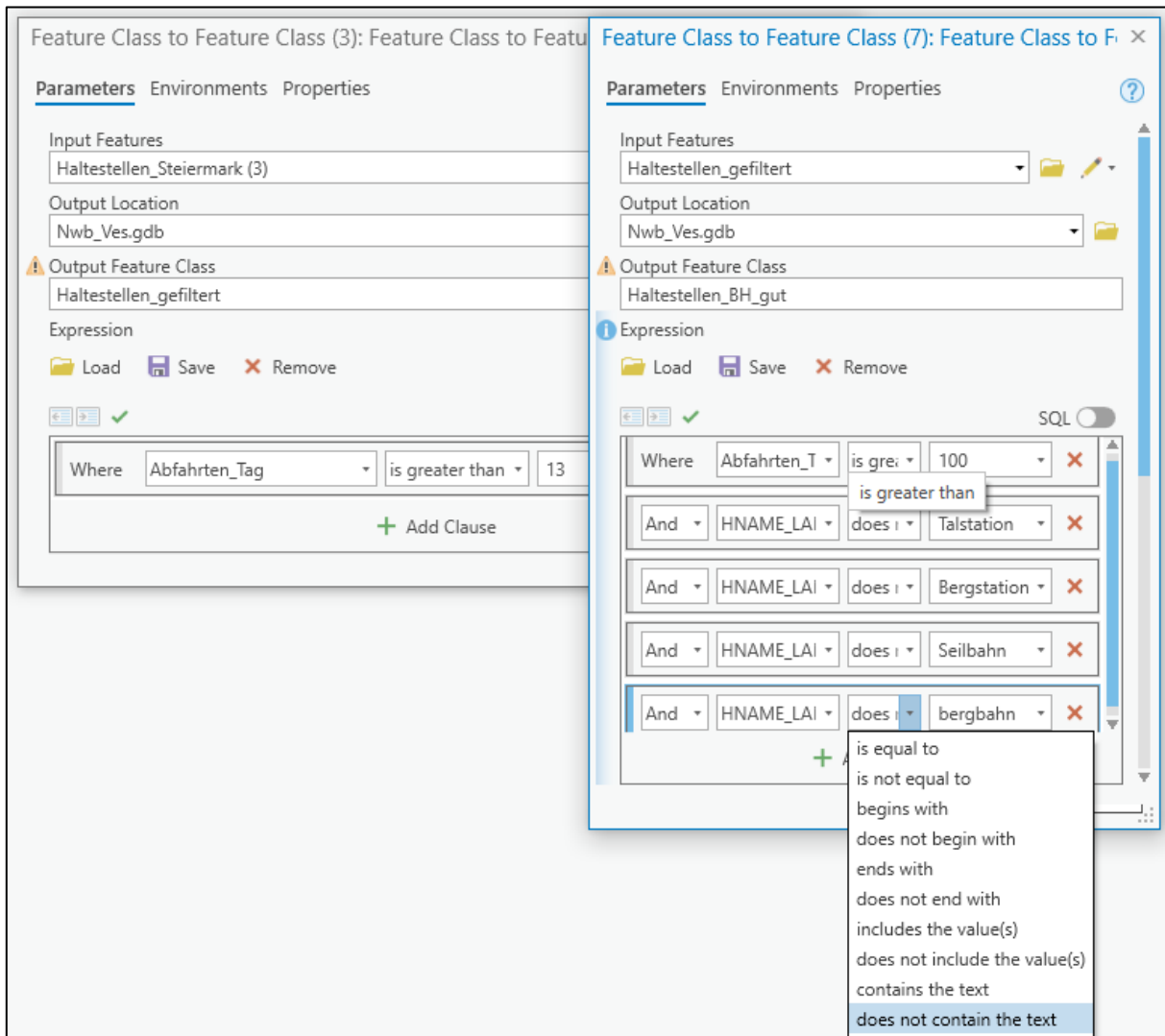


Abb. 31: Die beiden Einstellungsfenster des Tools „Feature Class to Feature Class“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Nun war der Datensatz für den zweiten größeren Schritt, der Klassifizierung, bereit. Gemäß den wissenschaftlich belegten Vorgaben in Kapitel „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ wurden alle zuvor gefilterten Haltestellen in drei Klassen aufgeteilt: Haltestellen mit hoher Bedienungshäufigkeit über 100 Abfahrten pro Tag, mittlerer Bedienungshäufigkeit über 40 bis 100 Abfahrten pro Tag sowie geringer Bedienungshäufigkeit über 13 bis 40 Abfahrten pro Tag. Im Rahmen der Masterarbeit musste aber noch eine vierte Sonderklasse hinzugefügt werden, die defektive (mit Unsicherheit behaftete) Haltestellen beinhaltet, welche zu verzerrten Ergebnissen geführt hätten. Grund dafür ist der Umstand, dass diesen Haltestellen auch die Abfahrten von Seil- und sonstigen Bergbahnen angerechnet wurden, die bei alltäglichen Erledigungen der Wohnbevölkerung in der Regel keine Relevanz darstellen. Im Gegensatz zu

den ausgeschlossenen Haltestellen mit einer Bedienungshäufigkeit von maximal 13 Abfahrten pro Tag mussten die defektiven Haltestellen ebenso den Erreichbarkeitsanalysen unterzogen werden, da ihre maximalen fußläufigen Einzugsgebiete nicht klar besteuert werden konnten und daher von allen später berechneten Steuerpolygonen ausgeschnitten werden mussten. Die entsprechenden Einzugsgebiete wurden dann als Flächen ohne Angabe ausgewiesen.

Für die vier erläuterten Klassen wurde das Geoverarbeitungswerkzeug „Feature Class to Feature Class“ vierfach ausgeführt (siehe Abb. 29, Box „Klassifizierung“). Im rechten Fenster der Abbildung 31 ist die Bildung der Klasse „Haltestellen_BH_gut“ (Haltestellen mit hoher Bedienungshäufigkeit) ersichtlich. Dort wurde die Bedingung festgelegt, dass alle Haltestellen mit über 100 Abfahrten pro Tag („is greater than 100“) herangezogen werden. Außerdem musste mit weiteren Bedingungen sichergestellt werden, dass die Features unter dem Attribut „HNAME_LANG“, welches Auskunft über die an der jeweiligen Haltestelle verfügbaren Transportmittel gibt, keine Bezeichnungen wie „Talstation“, „Bergstation“, „Seilbahn“ oder „bergbahn“ enthalten. Dieses Kriterium wurde mit der Bedingung „does not contain the text“ und And-Verknüpfungen erfüllt. Letztere gewährleisten, dass auf ein Feature alle Bedingungen zutreffen müssen, um es zu filtern. Die weiteren zwei Klassen „Haltestellen_BH_mittel“

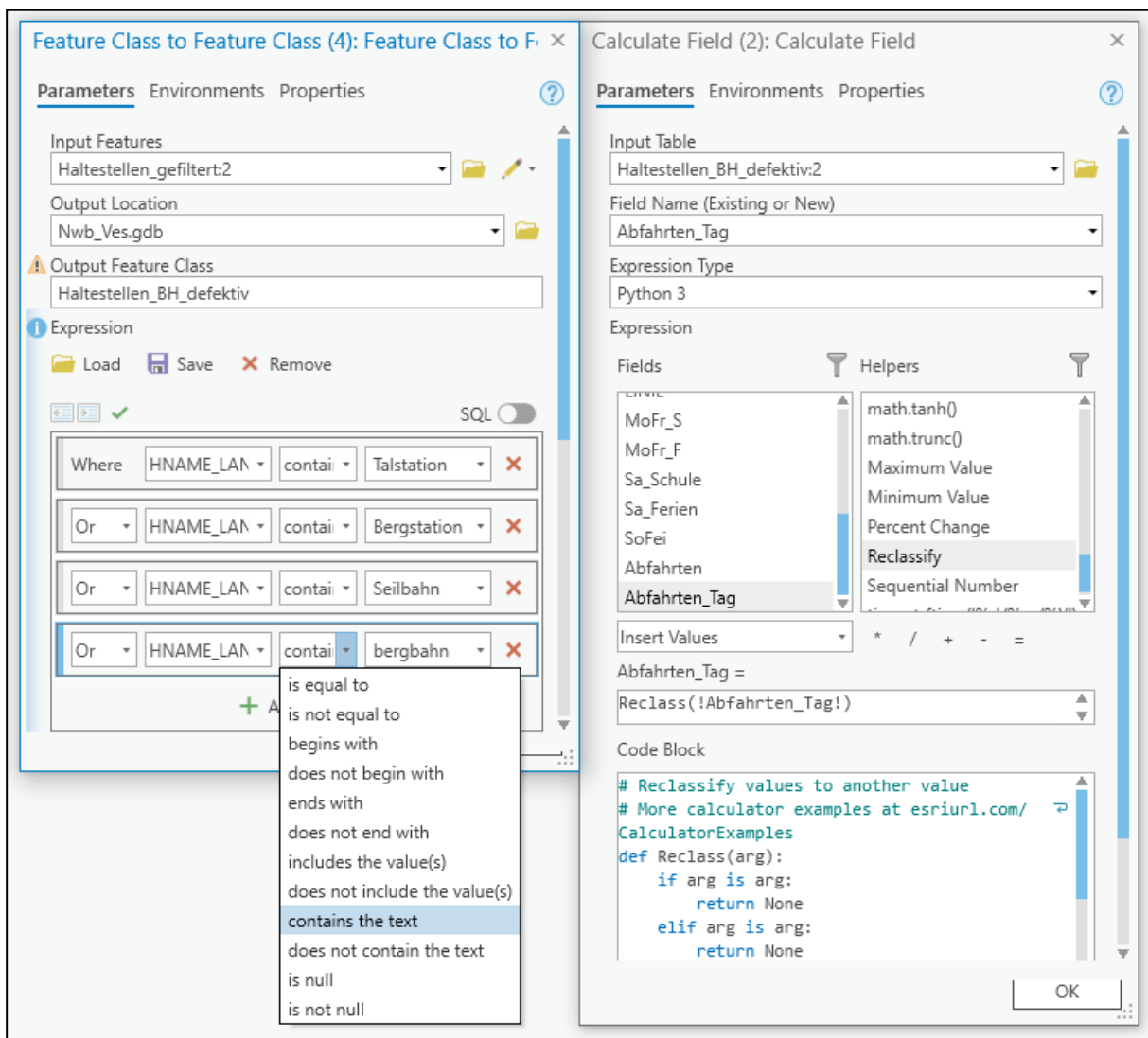


Abb. 32: Einstellungsfenster der Tools „Feature Class to Feature Class“ und „Calculate Field“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

(Haltestellen mit mittlerer Bedienungshäufigkeit) sowie „Haltestellen_BH_schlecht“ (Haltestellen mit geringer Bedienungshäufigkeit) wurden nach demselben Schema gefiltert.

Auch die defektiven Haltestellen wurden mit dem Tool „Feature Class to Feature Class“ zu einer Klasse („Haltestellen_BH_defektiv“) vereint (siehe Abb. 32, linkes Fenster). In diesem Fall mussten die einzelnen Bedingungen („contains the text“) mit der Or-Operation verknüpft werden, da ein Feature bereits dieser Klasse angehört, sobald es zumindest einen der Begriffe „Talstation“, „Bergstation“, „Seilbahn“ oder „bergbahn“ enthält.

Wie bereits erwähnt, dürfen die maximalen fußläufigen Einzugsbereiche der defektiven Haltestellen nicht in die Steuerberechnung einfließen und folglich auch keine Gewichtung aufweisen. Zu diesem Zweck kam das Tool „Calculate Field“ zum Einsatz (siehe Abb. 29, Box „Klassifizierung“). Dank der Einstellungen im rechten Fenster der Abbildung 32 konnten alle Features dieser Klasse unter dem Attribut „Abfahrten_Tag“ durchgehend mit Nullwerten versehen werden. Dies wurde mittels einer Reclassify-Funktion im Rahmen einer Python-Expression erreicht. Diese Nullwerte wurden an späterer Stelle mit den Gewichtungen deckungsgleicher Polygone addiert bzw. multipliziert, woraus wiederum Nullwerte resultierten. Somit war die Vorbereitung der Haltestellen abgeschlossen (siehe Abb. 33).

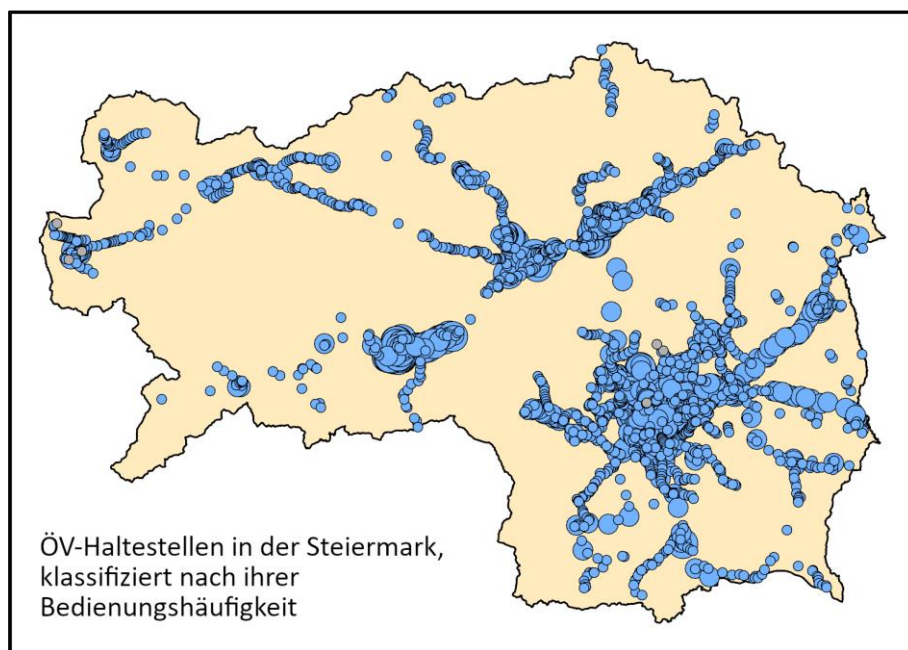


Abb. 33: ÖV-Haltestellen in der Steiermark (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

9.1.3. Daseinsvorsorge

Die Einrichtungsdatensätze der Daseinsvorsorge bzw. des täglichen Bedarfs stammen von unterschiedlichen Anbietern (die Gründe dafür sind in Kapitel „8.2. Datensätze“ angeführt). Jene von der Geoinformationsabteilung des Landes Steiermark umfassten zum Zeitpunkt ihres Imports 3.019 Features (niedergelassene Ärzte), 203 Features (Apotheken) sowie 946 Features (Bildungsstandorte). Die beiden Datensätze von OpenStreetMap, aus welchen die Supermärkte abgeleitet wurden, bestanden ursprünglich aus 258.131 Features (Punktgeometrie) sowie 127.544 Features (Polygoneometrie). Bezugnehmend auf diese Einrichtungen wird wiederum

die Forschungsfrage beantwortet, welche Parameter in die Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer miteinbezogen werden sollen. Der Import aller fünf aufgelisteten Datensätze ist in den Boxen „Supermärkte“, „Allgemeinmediziner“, „Volksschulen“ sowie „Apotheken“ der Abbildung 34 visualisiert. Der Grund für die Wahl genau dieser Einrichtungen der Daseinsvorsorge lässt sich im Kapitel „6.5. Erreichbarkeit der Daseinsvorsorge“ nachlesen.

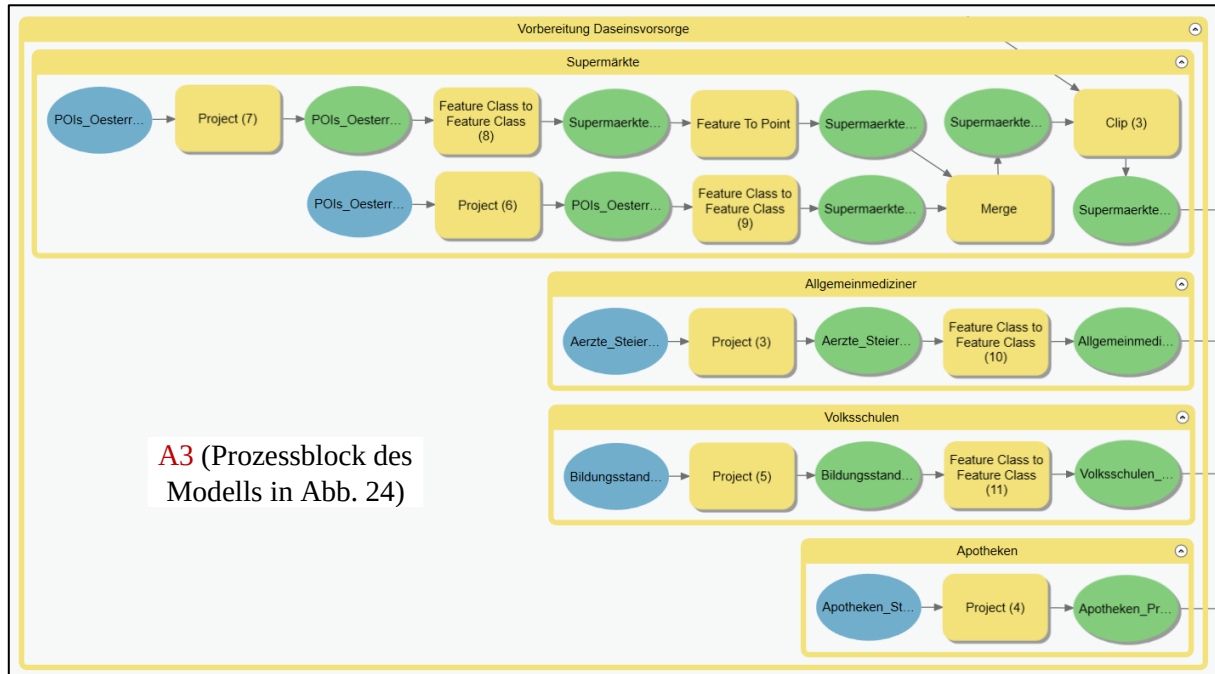


Abb. 34: Vorbereitung der Einrichtungen der Daseinsvorsorge in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Die beiden Datensätze von OSM wurden wie auch alle zuvor behandelten Geodaten an die Projektion der Basemap angepasst. Des Weiteren wurden alle Supermarkt-Features anhand des Geoverarbeitungswerkzeugs „Feature Class to Feature Class“ extrahiert. Beide Bearbeitungsschritte sind in der Box „Supermärkte“ der Abbildung 34 repräsentiert. Da die Features der oberen Prozessreihe eine Polygeometrie aufwiesen, mussten sie aus Kompatibilitätsgründen in Punkte transformiert werden. Dies erfolgte mithilfe des Tools „Feature To Point“ (siehe Abb. 34, Box „Supermärkte“). Durch diese Transformation, deren Input- und Outputdaten im linken Fenster der Abbildung 35 eingesehen werden können, wurde im Schwerpunkt jedes Polygons ein Pointfeature erstellt.

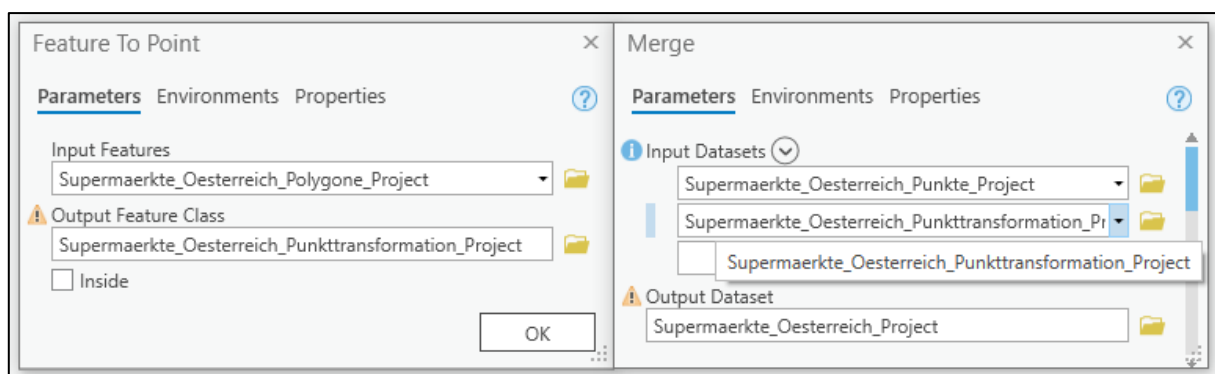


Abb. 35: Einstellungsfenster der Tools „Feature To Point“ und „Merge“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Während also ein Teil der Supermärkte bereits als Punktfeatures in die Arbeit integriert werden konnte, musste der andere Teil erst in Punktgeometrie transformiert werden. Danach war es mittels „Merge“ (siehe Abb. 34, Box „Supermärkte“) erforderlich, diese beiden Datensätze zu vereinen, um sie in gesammelter Form weiterbearbeiten zu können. Wiederum sind die Eingangs- und Ausgangsdaten genauer in Abbildung 35 – rechtes Fenster – ersichtlich. Zum Schluss musste der zusammengeführte Datensatz noch anhand des Tools „Clip“ auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten werden (siehe Abb. 34, Box „Supermärkte“).

Die drei Datensätze der Geoinformationsabteilung des Landes Steiermark konnten in weniger Schritten vorbereitet werden, da sie bereits in Punktgeometrie sowie mit passender räumlicher Abgrenzung vorhanden waren. Nach der Vereinheitlichung ihrer Projektionen war es nur notwendig, die Allgemeinmediziner aus ihrem übergeordneten Datensatz „Niedergelassene Ärzte“ und die Volksschulen aus ihrem übergeordneten Datensatz „Bildungsstandorte“ mithilfe des Geoverarbeitungswerkzeugs „Feature Class to Feature Class“ zu extrahieren (siehe Abb. 34, Boxen „Allgemeinmediziner“, „Volksschulen“ und „Apotheken“). Nun waren auch alle Einrichtungen der Daseinsvorsorge fertig vorbereitet (siehe Abb. 36).

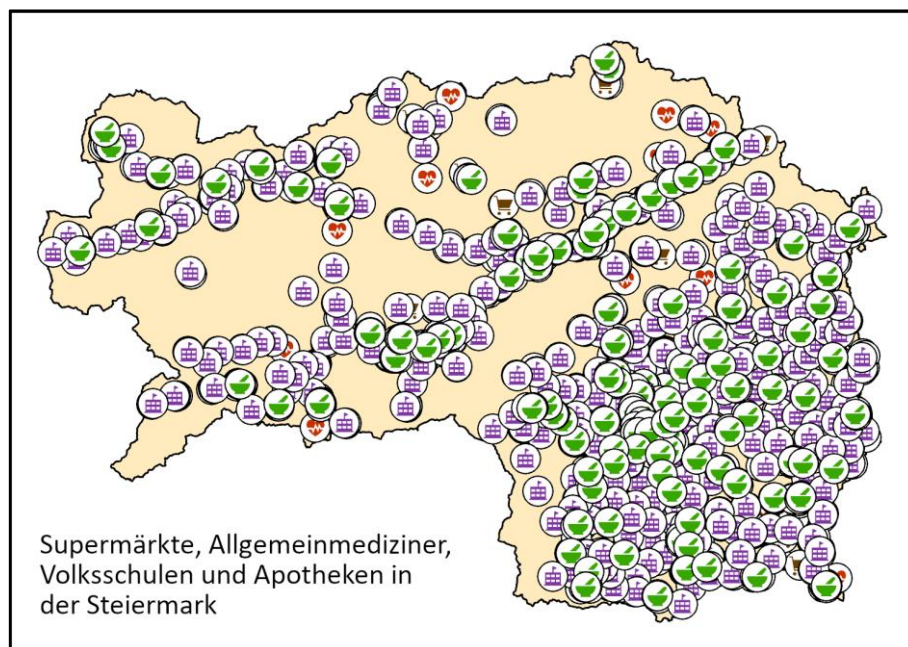


Abb. 36: Daseinsvorsorge in der Steiermark (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

9.1.4. Straßen- und Wegenetz

Zweck der Vorbereitung des Straßen- und Wegenetzes war es, einen Verkehrsgraphen für die späteren Netzwerkanalysen bereitzustellen, der sowohl flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorhanden als auch auf den Fuß- und Radverkehr ausgelegt ist. Der Import des kompletten Netzwerks der GIP umfasste 1.446.626 Features. Nach Anpassung der Projektion und Zuschnitt auf die räumliche Ausdehnung der Steiermark (siehe Abb. 37) erfolgte mithilfe der Datenbeschreibung, die zusammen mit dem Netzwerk vom ÖVDAT zur Verfügung gestellt wurde, eine umfassende Aussortierung des Verkehrsgraphen.

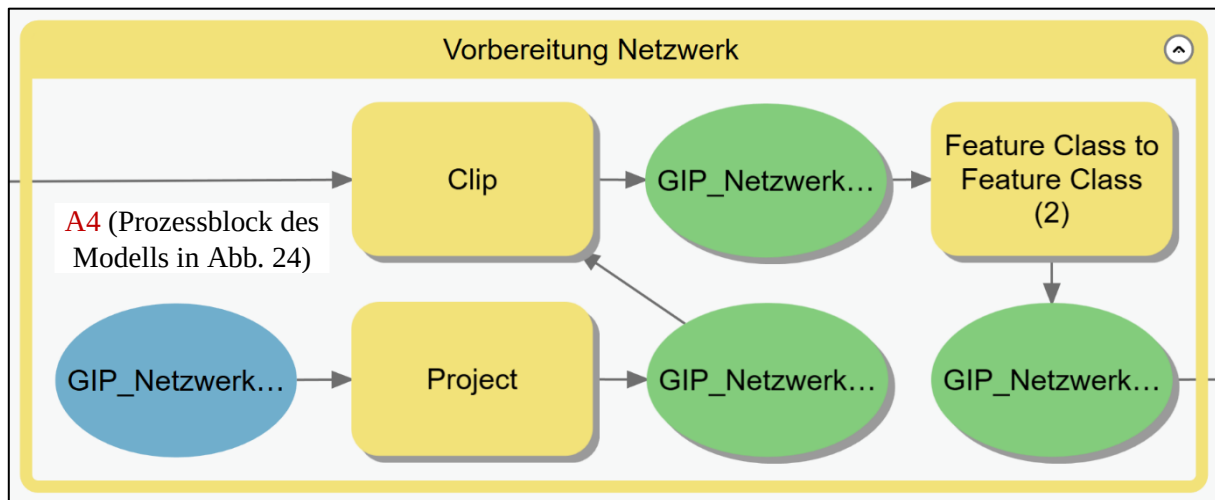


Abb. 37: Vorbereitung des Netzwerks in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Die Tabellen 6 und 7 (zwei zusammengehörige Tabellenteile) geben Aufschluss darüber, welche Bestandteile des Verkehrsgraphen im nachfolgenden Filterungsprozess aussortiert wurden. Während sich in der Spalte „EDGE CAT“ die Kürzel der Straßen- bzw. Wegkategorien vorfinden lassen, stehen in der Spalte „Name“ die vollständigen Bezeichnungen der jeweiligen Kategorien. Die dritte Spalte umfasst eigene Kommentare, welche ausschließlich im Kontext der Masterarbeit zu verstehen sind. Sie dienen der Nachvollziehbarkeit der Aussortierung einzelner Straßen und Wege, indem die Brauchbarkeit einer Kategorie begründet wird. Handelt es sich um eine geeignete Kategorie, so ist die entsprechende Zeile als Ergänzung zur textlichen Einstufung grün markiert – was darauf hinweist, dass die betreffende Kategorie zur Weiterbearbeitung ausgewählt wurde. Im Falle einer ungeeigneten Kategorie ist die entsprechende Zeile hingegen rot hinterlegt, weshalb sie nicht für den weiteren Gebrauch herangezogen wurde. Grundsätzlich galt die Voraussetzung, dass die Straßen und Wege für den NMIV (hauptsächlich Fuß- und Radverkehr) zugänglich sein müssen, um in die Netzwerkanalysen einbezogen werden zu können.

EDGE CAT	Name	Eigene Kommentare
A	Autobahn	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
AW	Almweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
B	Landesstraße B	geeignet (teilweise für NMIV zugänglich)
BA	Bringungsanlage	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
BS	Bundesstraße Deutschland	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
EA	Eisenbahn Anschlussbahn	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
EH	Eisenbahn hochrangig	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
EL	lokale Eisenbahn	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
EN	Eisenbahn Nebenbahn	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
ES	sonstige Eisenbahn	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
EU	Eisenbahn U-Bahn	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
F	Fluchtweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
FS	Forststraße/-weg	geeignet (für NMIV zugänglich)

Tab. 6: Eignung der Straßen- und Wegkategorien für die Netzwerkanalysen, oberer Tabellenteil (Datengrundlage: ÖVDAT 2020; eigene Darstellung, 2020)

EDGE CAT	Name	Eigene Kommentare
FW	Fußweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
G	Gemeindestraße	geeignet (für NMIV zugänglich)
GF	Güter-/Forstweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
GI	Gemeindestr. (Landesinstandhaltung)	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
GS	Genossenschaftsstraße	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
GW	Güterweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
H	Hauptstraße	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
HA	Hauptstraße A	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
HB	Hauptstraße B	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
I	Interessantenweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
IO	Interessantenstraße öffentlich	geeignet (für NMIV zugänglich)
KR	Kreisstraße Deutschland	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
KW	Konsortialweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
L	Landesstraße L	geeignet (teilweise für NMIV zugänglich)
LS	Landesstraße Italien	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
LD	Landesstraße Deutschland	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
M	Mountainbikeweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
N	nicht bekannt	geeignet (gemäß eigener Stichprobenprüfung)
OW	ÖWG Instandhaltungsweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
P	hochrangige Privatstraße	geeignet (Berücksichtigung von Anrainern)
PO	Privatstraße teilöffentlich	geeignet (für NMIV zugänglich)
PS	Privatstraße/-weg	geeignet (Berücksichtigung von Anrainern)
PW	Privatweg	geeignet (Berücksichtigung von Anrainern)
R	andere Straße	geeignet (gemäß eigener Stichprobenprüfung)
RW	Radweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
S	Schnellstraße	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
SB	Seilbahn	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
SD	Staatsstraße Deutschland	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
SG	Wandersteig	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
SS	Staatsstraße Italien	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
SW	stillschweigend gewidmete Straße	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
ST	Straßenbahntrasse	ungeeignet (für NMIV nicht zugänglich)
T	Tourismus	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
TW	Treppelweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
U	Rad- bzw. Fußweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
UR	überregionaler Radweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
VS	Verbindungsstraße	geeignet (für NMIV zugänglich)
VW	Verbindungsweg	im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden
W	Weg	geeignet (für NMIV zugänglich)
WA	Wanderweg	geeignet (für NMIV zugänglich)
WW	Wirtschaftsweg	geeignet (für NMIV zugänglich)

Tab. 7: Eignung der Straßen- und Wegkategorien für die Netzwerkanalysen, unterer Tabellenteil (Datengrundlage: ÖVDAT 2020; eigene Darstellung, 2020)

(Anmerkung: Da der Quelldatensatz der GIP das gesamte Bundesgebiet umfasste, waren dort ursprünglich auch Straßen- bzw. Wegkategorien vorhanden, die nach dem Zuschnitt auf die räumliche Ausdehnung der Steiermark gänzlich weggefallen sind. Die betroffenen Kategorien wurden in den Tabellen entsprechend gekennzeichnet. Die Nomenklatur der GIP ist regionaladministrativ differenziert, sodass gewisse Kategorien für die Steiermark anders bezeichnet sind als für andere Bundesländer und umgekehrt (vgl. ÖVDAT 2019: 82). Beispielsweise ist die Kategorie „GF“ (Güter-/Forstweg) im Untersuchungsgebiet nicht vorhanden, weil deren Güter- und Forstwege stattdessen in den beiden Kategorien „GW“ (Güterweg) sowie „FS“ (Forststraße/-weg) zu finden sind.)

Der erwähnte Filterungsprozess wurde wiederum mit dem Tool „Feature Class to Feature Class“ vorgenommen (siehe Abb. 37). Die entsprechenden Einstellungen können Abbildung 38 entnommen werden. Dort ist ersichtlich, dass die geeigneten Straßen und Wege mit der Bedingung „is equal to“ aus dem gesamten Datensatz herausgefiltert wurden, wobei die Or-Operation erneut zum Einsatz kam. Wie in den Tabellen 6 und 7 bezeichnet „EDGE CAT“ jenes Attribut, welches die Straßen- bzw. Wegkategorie beschreibt. Außerdem lassen sich in den beiden Tabellen die vollständigen Namen der Kürzel (B, FS, FW usw.) nachlesen. Mit ihnen konnte im Tool ein Bezug zu den jeweiligen Features und somit zu den entsprechenden Straßen- bzw. Wegkategorien hergestellt werden. Alle Informationen zu den Kategorien und ihren Bezeichnungen wurden der mitgelieferten Datenbeschreibung der GIP entnommen.

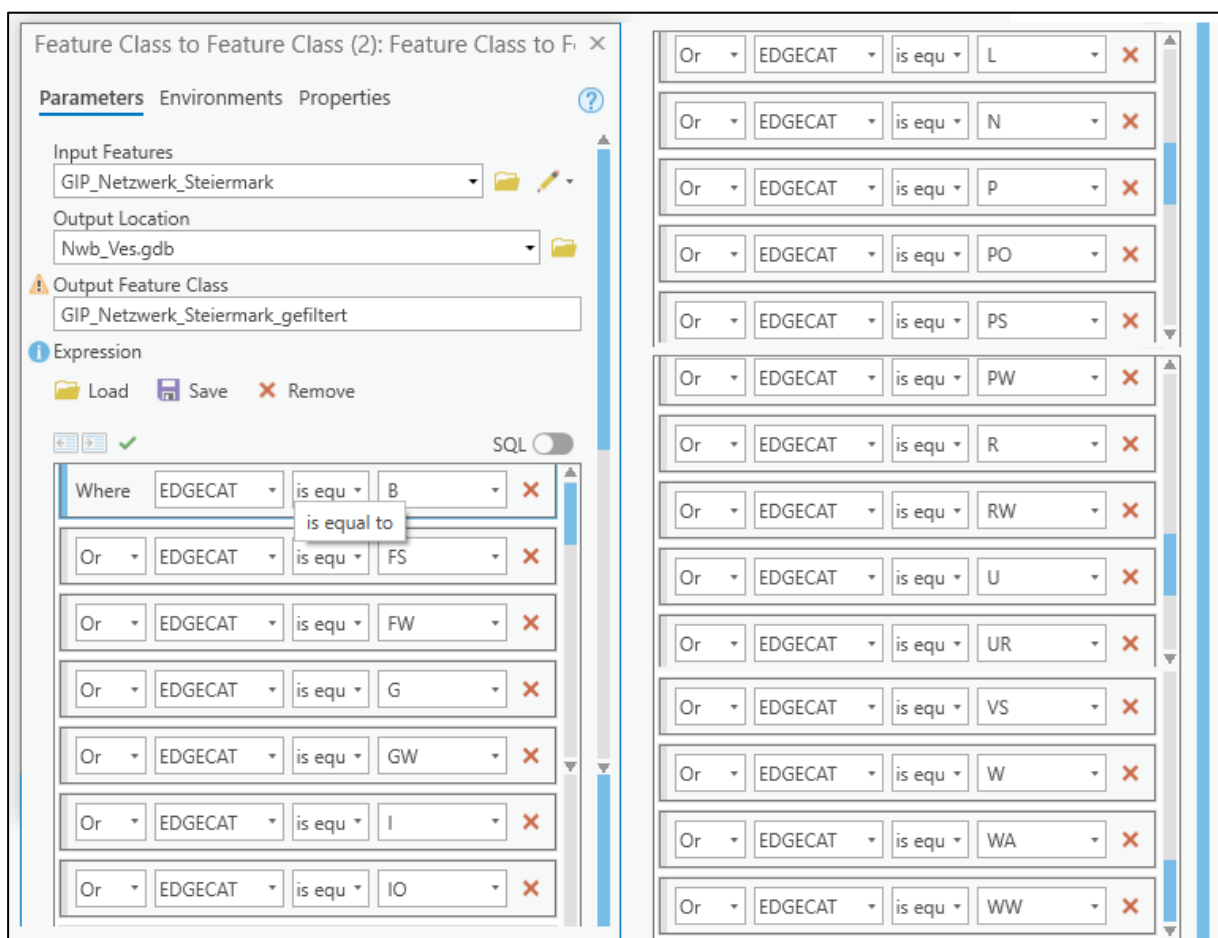


Abb. 38: Einstellungsfenster des Tools „Feature Class to Feature Class“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Nach dem erfolgten Filterungsprozess war auch der Verkehrsgraph für die Netzwerkanalysen vorbereitet (siehe Abb. 39).

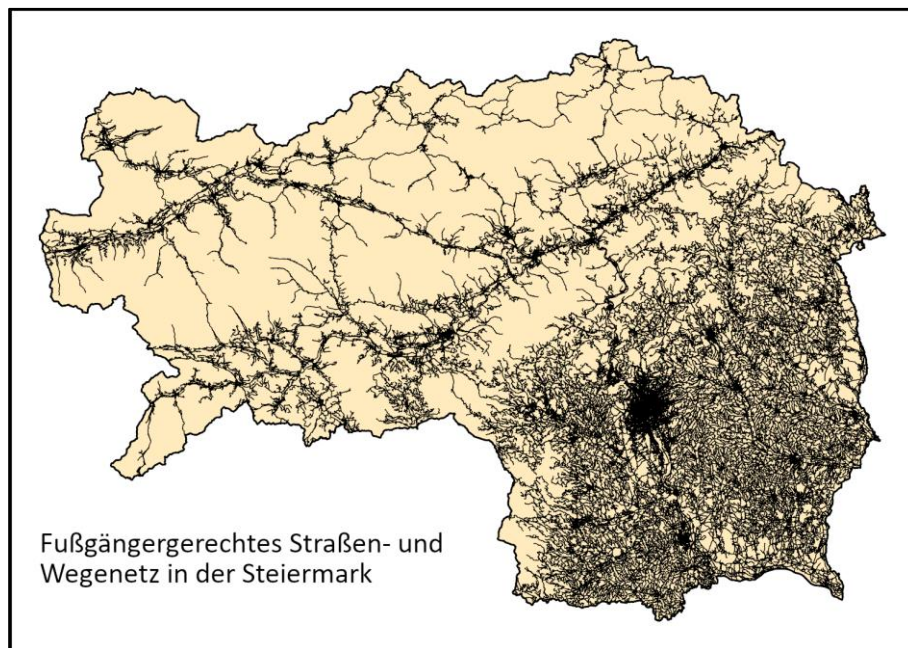


Abb. 39: Verkehrsgraph in der Steiermark (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

9.2. Netzwerkanalysen

9.2.1. Network Dataset

Bevor mit den Netzwerkanalysen begonnen werden kann, benötigt man ein sogenanntes Network Dataset. Dieses enthält nicht nur den vorbereiteten Verkehrsgraph, sondern auch diverse Regeln, die dann im Zuge der Netzwerkanalysen berücksichtigt werden müssen. Da ein Network Dataset nur in einem Feature Dataset verarbeitet werden kann, musste zunächst letzteres angelegt und mit dem gefilterten Verkehrsgraphen der GIP befüllt werden. Diese beiden Schritte erfolgten anhand der Geoverarbeitungswerkzeuge „Create Feature Dataset“ sowie „Feature Class to Feature Class“ (siehe Abb. 40).

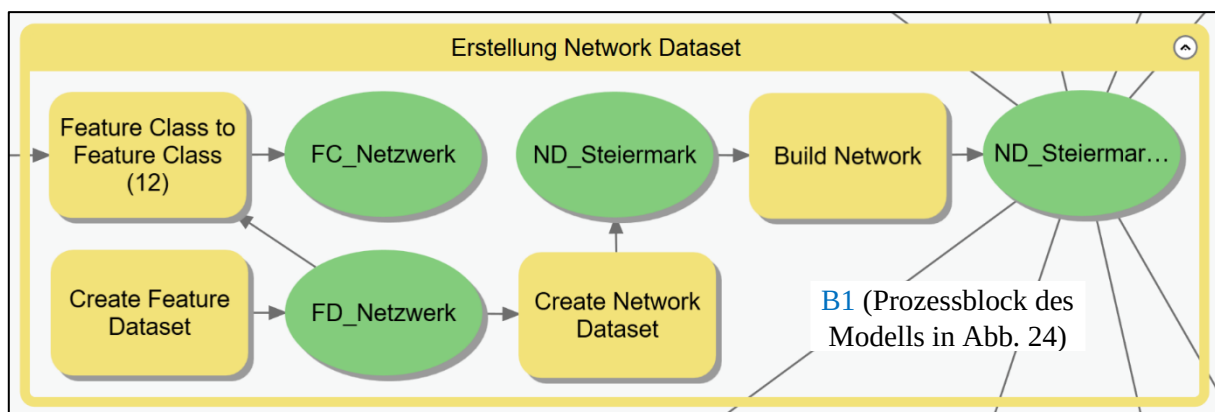


Abb. 40: Erstellung des Network Dataset in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Im linken oberen Fenster der Abbildung 41 sind die Geodatabase und der Name für das neue Feature Dataset ersichtlich. Außerdem musste das Koordinatensystem wieder entsprechend der Hintergrundkarte bzw. integrierten Datensätze eingestellt werden.

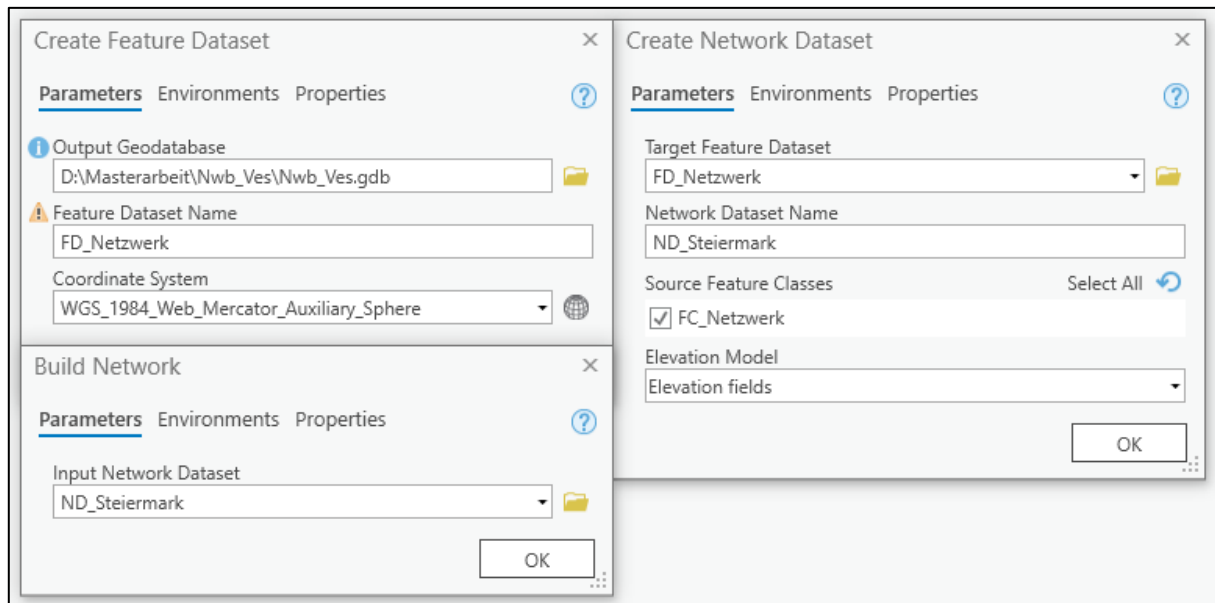


Abb. 41: Einstellungsfenster der Tools „Create Feature Dataset“, „Create Network Dataset“ und „Build Network“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Nun konnte das Network Dataset mittels „Create Network Dataset“ auf Basis des zuvor angelegten Feature Dataset erstellt werden (siehe Abb. 40). Im rechten Fenster der Abbildung 41 wird gezeigt, dass in den Einstellungen das gewünschte Feature Dataset sowie der Name des neuen Network Dataset zu wählen waren. Im Bereich „Source Feature Classes“ musste ein Häkchen bei „FC_Netzwerk“ – dem gefilterten Verkehrsgraphen der GIP – gesetzt werden. Falls Höhenunterschiede bei den Netzwerkanalysen eine Rolle spielen würden, so müsste beim „Elevation Model“ jenes Datenfeld ausgewählt werden, das die Höheninformation der Features gespeichert hat. Im Rahmen dieser Masterarbeit blieben diese jedoch unberücksichtigt.

Nachdem das Network Dataset erstellt wurde, mussten alle erforderlichen Netzwerkregeln festgelegt werden. Via Rechtsklick auf den Datensatz und Aufruf der Eigenschaften gelangt man in das Einstellungsmenü, welches sich aus mehreren Untermenüs zusammensetzt. Da für Analysen basierend auf einem Fuß- und Radverkehrsnetz wesentlich weniger Regeln als bei hochkomplexen Situationen im ÖV und MIV benötigt werden, blieb ein Großteil der Netzwerkeinstellungen unverändert. Dennoch mussten folgende Kriterien eingerichtet werden: Als Reisemodus wurde die Gehdistanz bzw. das Zufußgehen gewählt, als Impedanz wurden Meter herangezogen und U-Turns (das Wenden um 180 Grad) wurden gestattet. Des Weiteren wurde noch festgelegt, dass für FußgängerInnen keinerlei Zutrittsbeschränkungen oder sonstige Restriktionen vorhanden sind, da bereits alle untauglichen Straßen und Wege im Zuge der Vorbereitung des Datensatzes aussortiert wurden.

Im letzten Schritt erfolgte anhand des Tools „Build Network“ die Übernahme aller festgelegten Regeln im Netzwerk und damit einhergehend dessen Bereitstellung für die Analysen (siehe Abb. 40). Im entsprechenden Einstellungsmenü (siehe Abb. 41, linkes unteres Fenster) war lediglich das betreffende Network Dataset zu wählen. Auf Basis des hier bereitgestellten Netzwerks konnten in weiterer Folge alle Netzwerkanalysen durchgeführt werden.

9.2.2. ÖV-Haltestellen

Wie in Kapitel „5.3. GIS-Netzwerkanalyse“ dargelegt, werden Netzwerkanalysen im Allgemeinen sowie Einzugsgebietsanalysen im Speziellen über bestimmte Layer abgewickelt. Letztere benötigen ein Network Dataset als Inputdatei und sind hinsichtlich ihres Aufbaus sowie ihrer Funktionsweise optimal für derartige Analysen konzipiert. Diese Layer lassen sich für Einzugsgebiete über das Geoverarbeitungswerkzeug „Make Service Area Analysis Layer“ erstellen, welches im Falle der Haltestellen insgesamt viermal – einmal pro Haltestellenklasse – generiert werden musste (siehe Abb. 42).

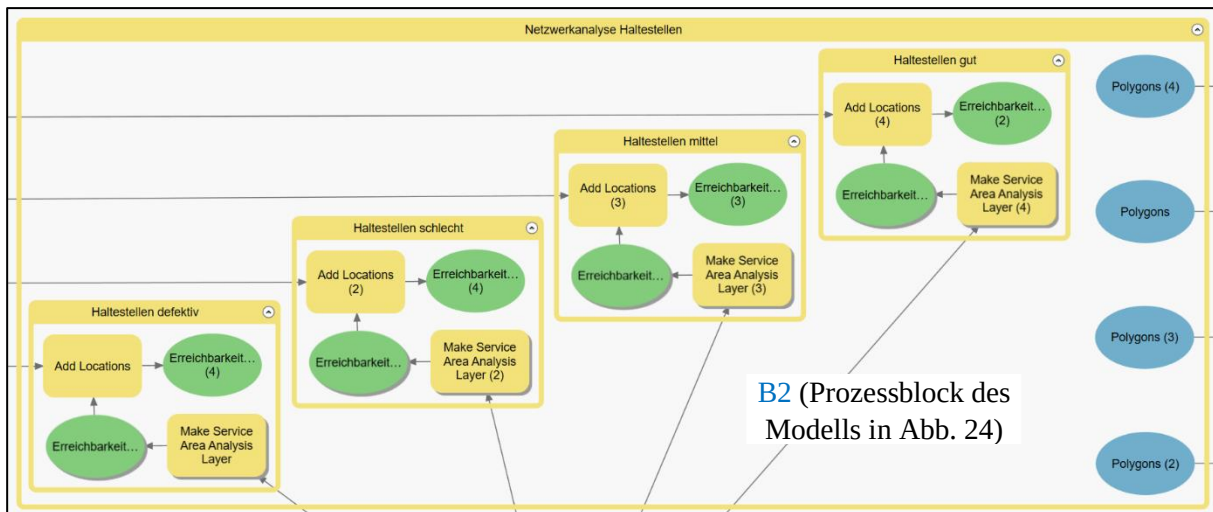


Abb. 42: Netzwerkanalysen der Haltestellen in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

In Kapitel „9.1.2. Haltestellen“ wurde bereits umfassend erläutert, wie und weshalb die Haltestellen in vier Klassen gegliedert wurden. Da sich die Erreichbarkeitspolygone der einzelnen Haltestellenklassen hierarchisch überlagern müssen und folglich die Netzwerkanalyse pro Haltestellenklasse durchzuführen ist, war die Erstellung von vier Analyselayers vonnöten. Das rechte Fenster der Abbildung 43 ermöglicht einen detaillierten Einblick in das Einstellungsmenü eines solchen Layers. Aus diesem Fenster geht hervor, dass das zuvor bereitgestellte Network Dataset ausgewählt und dem neuen Layer ein Name vergeben wurde. Als Reisemodus wurde die Gehdistanz bestätigt und als Fortbewegungsrichtung wurde „Toward facilities“ festgelegt. Letztere Einstellung gewährleistet, dass die Wegfindung bei der Netzwerkanalyse in Richtung der Einrichtungen (hier: Haltestellen) erfolgt.

Die „Cutoffs“ im rechten Fenster der Abbildung 43 bilden ein zentrales Element für die Einzugsgebietsanalysen. Wie bereits in Kapitel „5.3.5. Einzugsgebietsanalyse“ geschildert, entsprechen die dort angeführten Grenzwerte den äußeren Umrandungslinien (Isochronen) der errechneten Erreichbarkeitspolygone. Im Falle der Haltestellen handelt es sich um 400 bzw. 800 Meter – die theoretische Basis für diese Distanzwerte kann in Kapitel „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ nachgelesen werden. Bezugnehmend auf diese Entfernungseinteilung wird (in Kombination mit den späteren Gewichtungen) eine der Forschungsfragen dahingehend beantwortet, wie sich das räumliche Angebot des öffentlichen Verkehrs in messbare Größen transformieren lässt.

Für die Klasse der defektiven Haltestellen wurde als einzige nur der Grenzwert von 800 Meter festgelegt. Der Grund dafür ist, dass das entsprechende fußläufige Einzugsgebiet von der

Steuerberechnung ausgenommen werden musste, weil die dafür notwendige Definition der Bedienungsqualität fehlt. Berechnungen auf Basis defektiver (mit Unsicherheit behafteter) Werte hätten zu verfälschten Ergebnissen geführt.

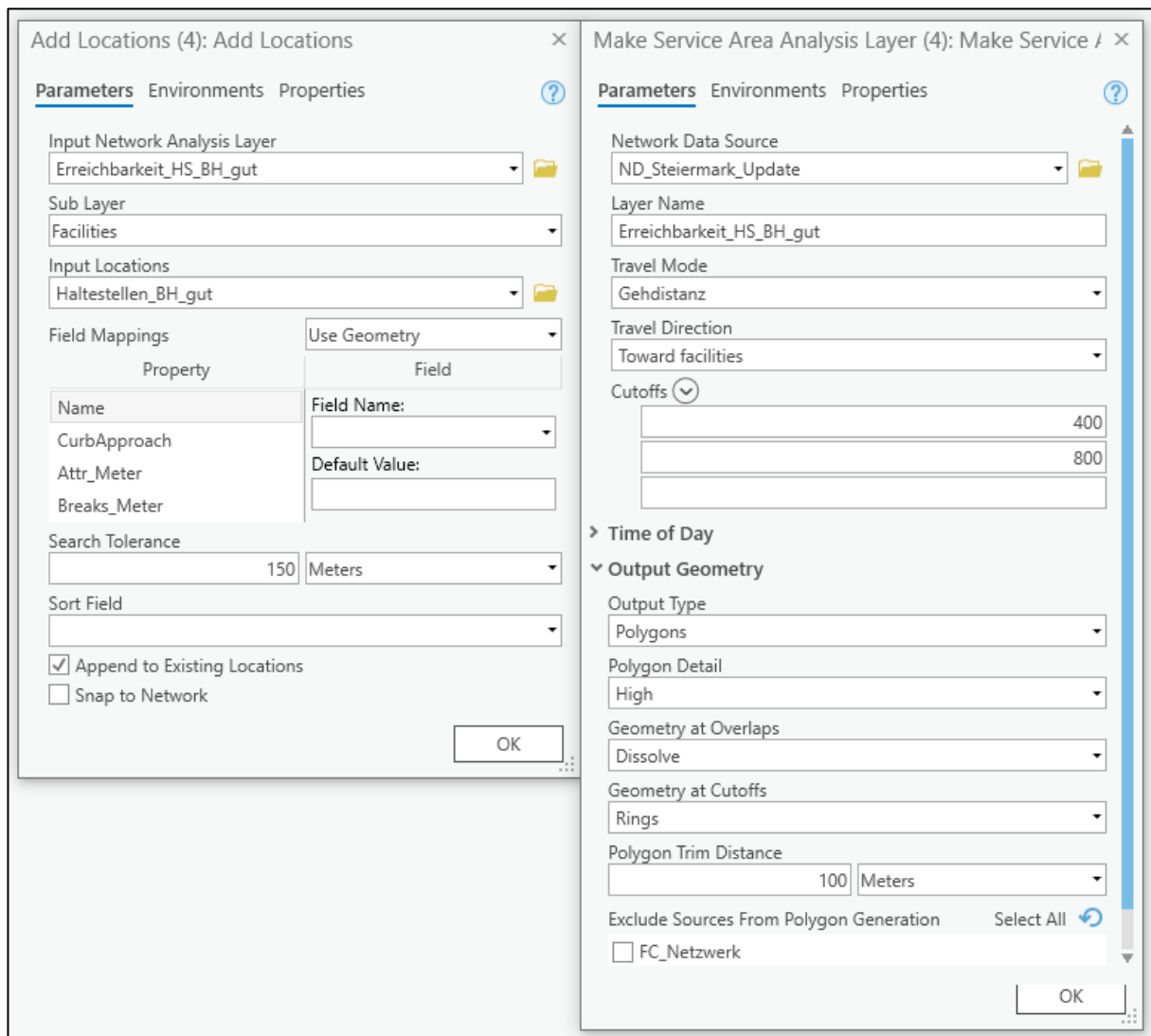


Abb. 43: Einstellungsfenster der Tools „Add Location“ und „Make Service Area Analysis Layer“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Als „Output Type“ wurden Polygone in einer hohen Detailstufe („High“) festgelegt, damit für eine räumlich exakte Steuerberechnung die Erreichbarkeitspolygone so präzise wie möglich ausgegeben werden konnten. Als „Geometry at Overlaps“ wurde „Dissolve“ eingestellt, weil dadurch genau zwei Klassen (Netzwerkdistancen bis 400 Meter sowie bis 800 Meter) als Resultat herauskamen. Im Falle der anderen beiden Optionen „Overlap“ und „Split“ hätte sich infolge anderer geometrischer Operationen eine Vielzahl an Klassen ergeben, welche für die weitere Bearbeitung unbrauchbar gewesen wäre. Die Einstellung „Rings“ wurde für „Geometry at Cutoffs“ gewählt, da auf diese Weise die beiden Polygonklassen voneinander unabhängige Flächen (ohne Überlappungen) aufweisen. Die „Polygon Trim Distance“ definiert die Pufferweite um die einzelnen Netzwerklinien und wurde als voreingestellte Standardeinstellung mit 100 Meter belassen, sodass auch Einrichtungen, die sich bis 100 Meter vom Netzwerk entfernt befinden, noch von der entsprechenden Reichweite abgedeckt wurden. Diese Einstellungen wurden auch für die restlichen drei Haltestellenklassen vorgenommen.

Nachdem alle geometrischen Parameter festgelegt wurden, mussten noch die Einrichtungen (hier: Haltestellen) in die vier Analyselayer importiert werden. Dies erfolgte anhand des Tools „Add Location“ (siehe Abb. 42), dessen Einstellungsoptionen im linken Fenster der Abbildung 43 ersichtlich sind. Neben den allgemeinen Settings war eine sogenannte „Search Tolerance“ zu definieren. Dabei handelt es sich um die maximale Distanz, welche die Haltestellen zum Netzwerk haben dürfen, um überhaupt in die Netzwerkanalysen einbezogen zu werden. Entfernungen jenseits dieses Limits wären für die Berechnungen nicht mehr sinnvoll, da die betroffenen Einrichtungen entweder für die Allgemeinheit nicht zugänglich sind oder aufgrund ihrer räumlichen Abgelegenheit die zuvor festgelegten Erreichbarkeitsgrenzwerte deutlich überschreiten würden. Diese Suchtoleranz wurde sowohl für alle Haltestellenklassen als auch für alle Einrichtungen der Daseinsvorsorge einheitlich festgelegt, damit es zwischen den einzelnen Netzwerkanalysen zu keinen Abweichungen kam. Der hier gewählte Wert von 150 Meter konnte sich jedoch erst im Zuge eines Annäherungsverfahrens als geeignet erweisen: Zuerst wurden mit dem voreingestellten Standardwert von 500 Meter alle Haltestellen und Einrichtungen hinzugefügt. Da die Prozessabschlussmeldung nach erfolgtem Import keine ausgeschlossenen Features meldete (weil offensichtlich alle maximal 500 Meter vom Netzwerk entfernt waren), wurde der Vorgang solange wiederholt, bis eine kritische Grenze erreicht war. Dieser Grenzwert lag bei 150 Metern, was sich als Optimum herausstellte, da er die beste Balance zwischen möglichst kurzer Distanz zum Netzwerk und möglichst wenig auszuschließenden Features darstellte. Von den vier Haltestellenklassen konnten ausnahmslos alle Features erfolgreich hinzugefügt werden (500 Haltestellen mit guter Bedienungsqualität, 431 Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität, 1.413 Haltestellen mit schlechter Bedienungsqualität sowie 7 defektive Haltestellen).

Nach dem Import konnte die Netzwerkanalyse pro Haltestellenklasse durchgeführt werden, woraus je zwei Polygonlayer (Entfernungen bis 400 Meter sowie bis 800 Meter) resultierten. Letztere sind beispielhaft für eine Haltestellenklasse veranschaulicht (siehe Abb. 44).

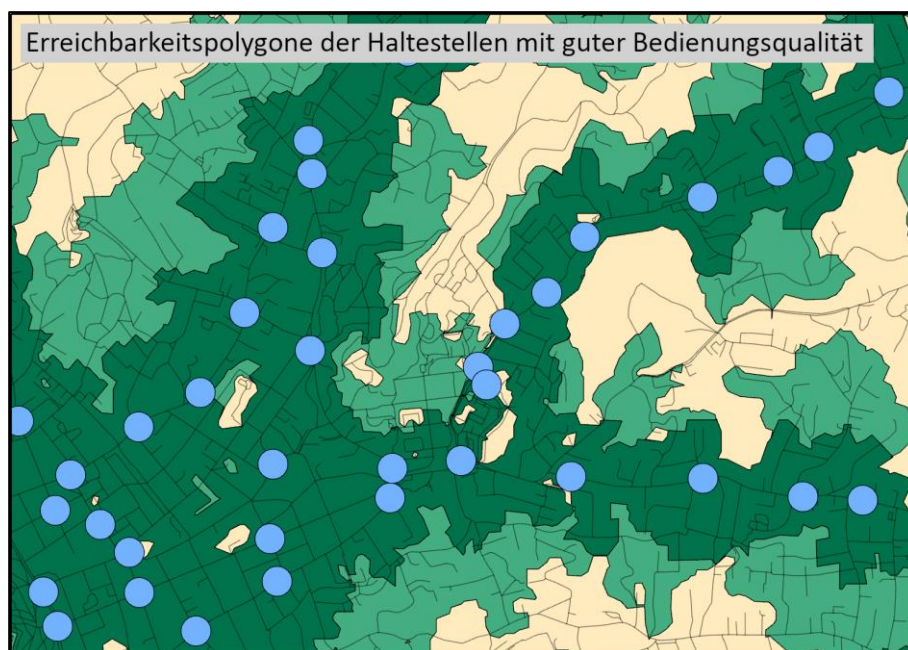


Abb. 44: Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit guter Bedienungsqualität, Netzwerkdistanz bis 400 Meter in Dunkelgrün und über 400 bis 800 Meter in Hellgrün (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

Diese Polygone mussten anschließend zu Feature Classes exportiert werden, um für die weitere Bearbeitung von Nutzen zu sein. Der Vorgang erfolgte mit dem bereits bekannten Geoverarbeitungswerkzeug „Feature Class to Feature Class“ (siehe Abb. 45).

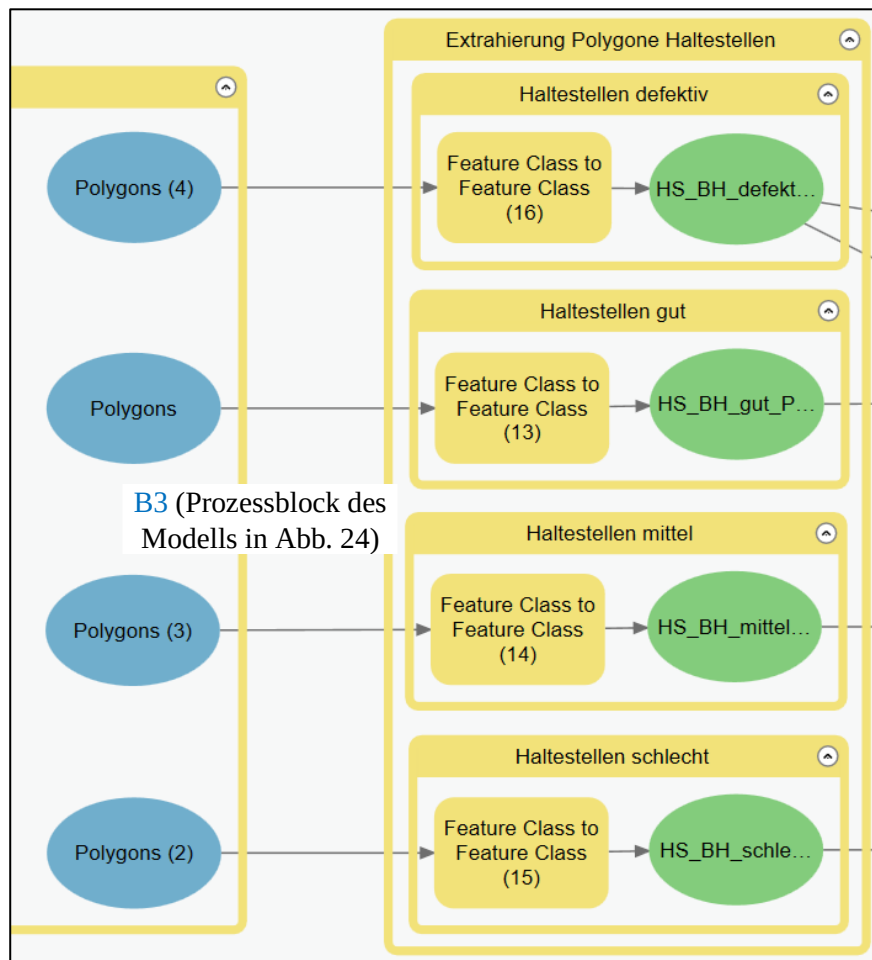


Abb. 45: Export der Erreichbarkeitspolygone je Haltestellenklasse in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

9.2.3. Daseinsvorsorge

Die Netzwerkanalysen mit den Einrichtungen der Daseinsvorsorge erfolgte als Pendant zu jener mit den Haltestellen (siehe Abb. 46). Auch hier mussten vier Analyselayer mithilfe des Tools „Make Service Area Analysis Layer“ erstellt werden, da es insgesamt vier Einrichtungsklassen (Supermärkte, Allgemeinmediziner, Volksschulen sowie Apotheken) gibt. Abgesehen von den „Cutoffs“ sind die Einstellungen mit jenen der Haltestellen identisch. Diese Grenzwerte der Erreichbarkeit wurden wiederum der wissenschaftlichen Theorie entnommen, welche bereits in Kapitel „6.5. Erreichbarkeit der Daseinsvorsorge“ dargelegt wurde. Demzufolge wurden die „Cutoffs“ der Supermärkte bei 500 und 1.000 Metern, der Allgemeinmediziner bei 800 und 1.200 Metern, der Volksschulen bei 1.000 und 2.000 Metern und der Apotheken bei 800 und 1.200 Metern gesetzt. Diesbezüglich wird (in Kombination mit den späteren Gewichtungen) eine der Forschungsfragen dahingehend beantwortet, wie sich die fußläufige Erreichbarkeit essenzieller Einrichtungen des täglichen Bedarfs in messbare Größen transformieren lässt.

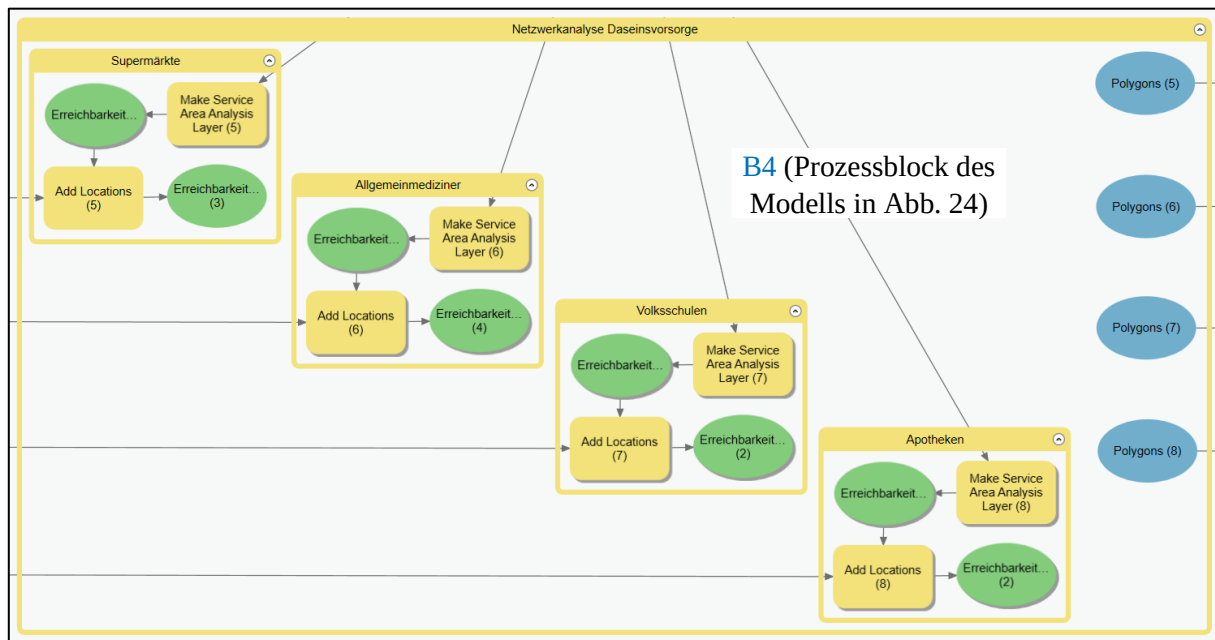


Abb. 46: Netzwerkanalysen der Daseinsvorsorge in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Auch der Import aller Features erfolgte nach selbem Prinzip wie bei den Haltestellen. Erneut wurden als Suchtoleranz 150 Meter gewählt, wodurch fast alle Features der Daseinsvorsorge hinzugefügt werden konnten. Es mussten von den insgesamt 728 Supermärkten lediglich zwei und von den insgesamt 1.497 Allgemeinmediziner lediglich fünf ausscheiden, weil sie sich weiter als 150 Meter vom Netzwerk befanden. Von den 461 Volksschulen sowie den 203 Apotheken konnten alle Features in den Analyselayer geladen werden.

Wieder erfolgte die Netzwerkanalyse pro Einrichtungstyp – in Summe viermal – und lieferte je zwei Polygonlayer (Entfernungen bis 400 Meter sowie bis 800 Meter) (Beispiel siehe Abb. 47).

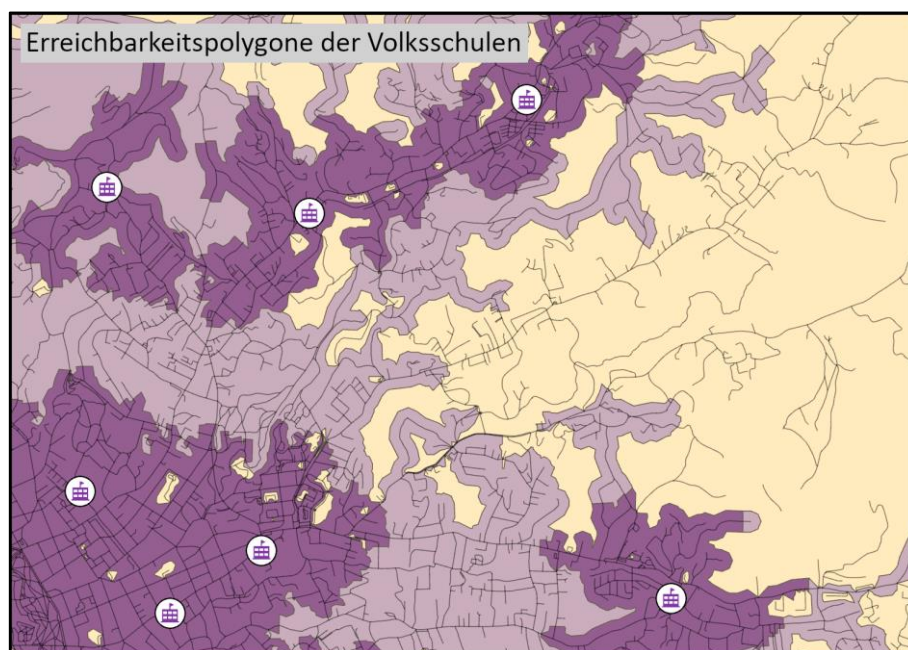


Abb. 47: Erreichbarkeitspolygone der Volksschulen, Netzwerkdistanz bis 400 Meter in Dunkelviolett und über 400 bis 800 Meter in Hellviolett (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

Auch Letztere mussten mithilfe des Geoverarbeitungswerkzeugs „Feature Class to Feature Class“ in Feature Classes umgewandelt werden, um für die weiteren Bearbeitungsschritte dienlich zu sein (siehe Abb. 48).

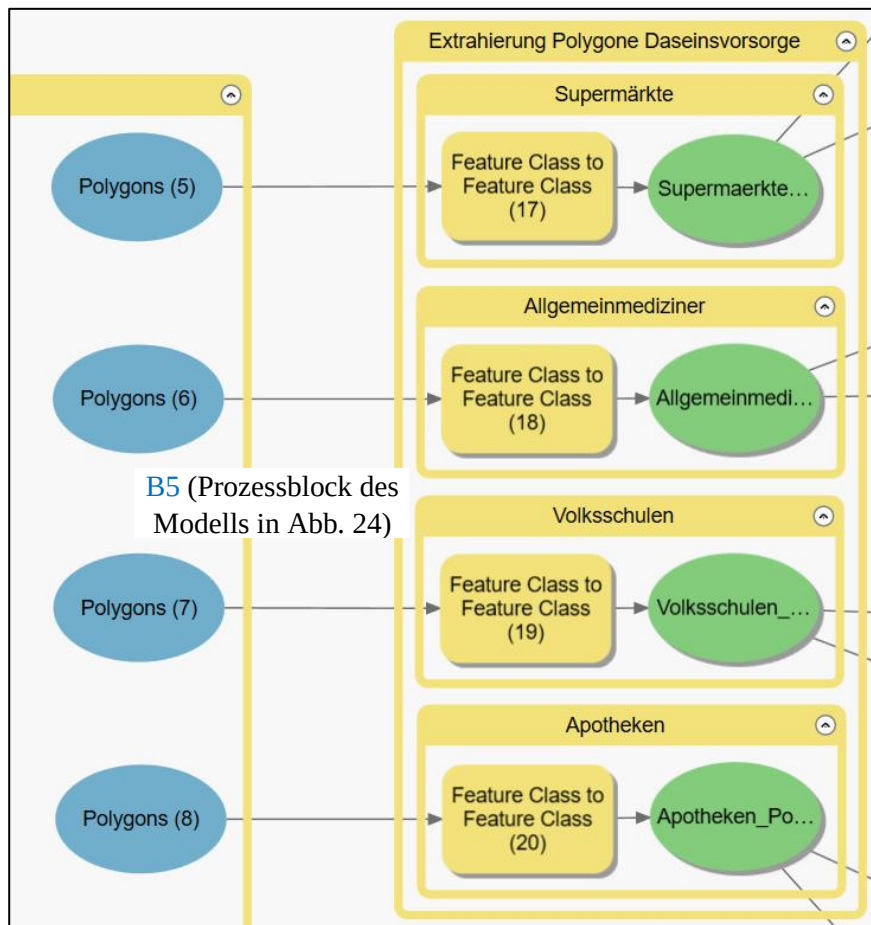


Abb. 48: Export der Erreichbarkeitspolygone je Einrichtungsklasse in Modellansicht (Screen-shot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

9.3. Gewichtungen

9.3.1. ÖV-Haltestellen

Die Gewichtung der Haltestellen erwies sich als der komplexeste Teil unter allen Prozessphasen. Es war eine Reihe an Geoverarbeitungswerkzeugen notwendig, um alle Haltestellen-Erreichbarkeitspolygone so zu gewichten, dass sie in angemessenen Verhältnissen in die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer einfließen konnten. Zweck dieser Prozesse war es auch, die zuvor erwähnte hierarchische Überlagerung der Haltestellenklassen umzusetzen. Dies erfolgte stufenweise mittels Ausstanzung einer Ebene durch die jeweils darüberliegende Ebene sowie ihrer anschließenden Vereinigung. In Abbildung 49 ist eine detaillierte Modellansicht aller Ausstanzungs- und Gewichtungsvorgänge dargestellt, auf die im Folgenden sowohl grafisch als auch textlich ausführlich eingegangen wird.

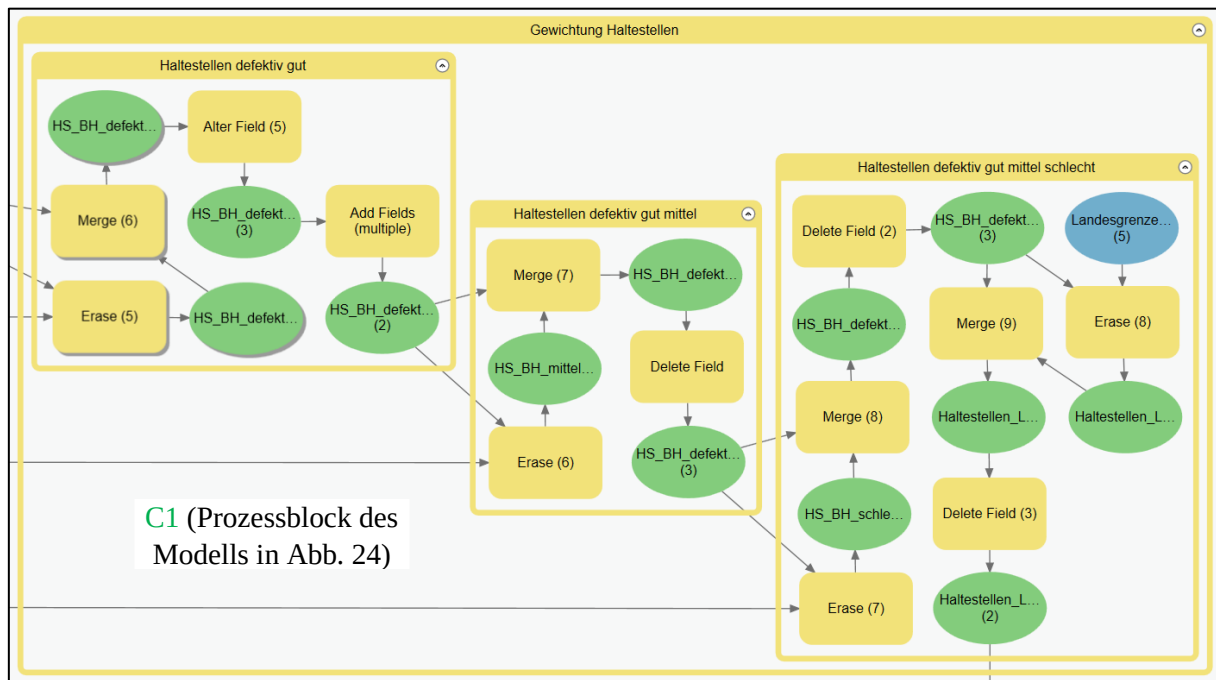


Abb. 49: Gewichtung und hierarchische Überlagerung der Haltestellenklassen in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird in Abbildung 50 das Prinzip der hierarchischen Überlagerung und Ausstanzung der Haltestellen-Erreichbarkeitspolygone grafisch vermittelt.

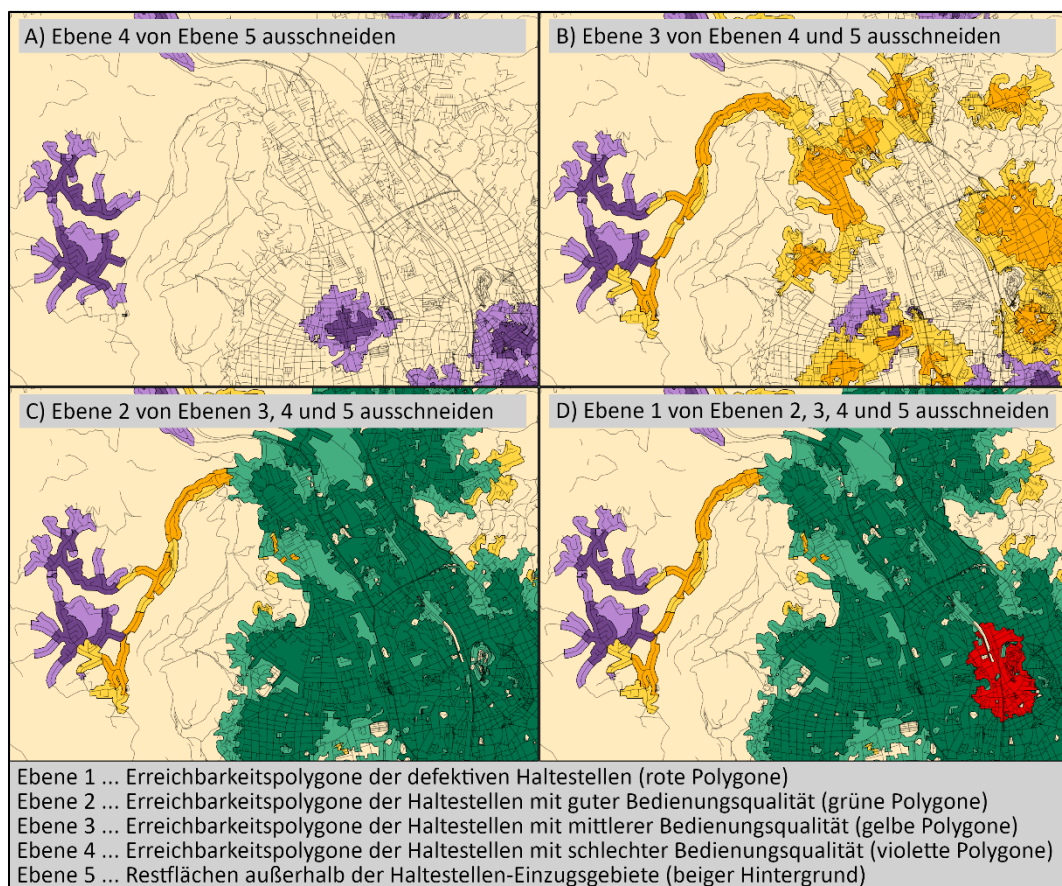


Abb. 50: Prinzip der hierarchischen Überlagerung und Ausstanzung der Haltestellen-Erreichbarkeitspolygone (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

Die dargestellte Überlagerung beruht auf folgendem Ansatz: Je besser die Bedienungsqualität der Haltestellen ist, desto höher liegen deren Erreichbarkeitspolygone in der Ebenenhierarchie. Denn sobald aus der Überlagerung eine gemeinsame Ebene resultiert, werden die Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit weniger Abfahrten pro Tag durch jene mit mehr Abfahrten pro Tag ersetzt. Falls sich also ein zu untersuchender Hauptwohnsitz im Einzugsbereich von Haltestellen unterschiedlicher Bedienungshäufigkeit befindet, so zählt letztlich nur die Gewichtung jener Einzugsbereiche mit der größten Bedienungshäufigkeit, weil der bzw. die betroffene BewohnerIn eine hochrangige Haltestelle in fußläufiger Reichweite hat.

Die konkrete Umsetzung des Prinzips aus Abbildung 50 erfolgte folgendermaßen: Zu Beginn mussten die Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit guter Bedienungsqualität und jene der defektiven Haltestellen vereinigt werden. Dazu wurden vorher die überlappenden Flächen der unteren Ebene (Haltestellen mit guter Bedienungsqualität) von jenen der oberen Ebene (defektive Haltestellen) ausgestanzt. Diese hierarchische Rangordnung resultiert aus dem Umstand, dass die defektiven Haltestellenpolygone vollständig erhalten bleiben mussten, weil deren fußläufigen Einzugsgebiete von der Berechnung der netzwerkbasieren Verkehrsemissionssteuer ausgenommen werden mussten.

Die Ausstanzung erfolgte mit dem Tool „Erase“, welches sowohl im Modell (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut“) ersichtlich ist als auch im linken Fenster der Abbildung 51 hinsichtlich der Einstellungsoptionen erklärt ist.

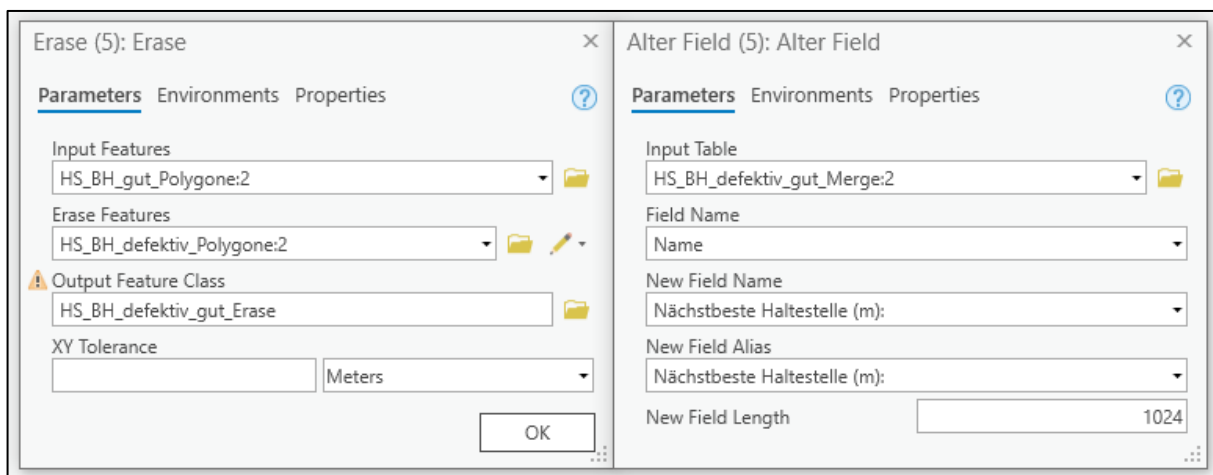


Abb. 51: Einstellungsfenster der Tools „Erase“ und „Alter Field“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Anschließend wurde das Input Feature (die untere Ebene) mit dem Erase Feature (die obere Ebene) mittels „Merge“ vereinigt (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut“), damit für die spätere Steuerberechnung eine einheitliche Ebene vorliegt. Anhand des darauffolgenden Geoverarbeitungswerkzeuges „Alter Field“ (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut“) wurde eine Attributspalte der vereinigten Ebene in „Nächstbeste Haltestelle (m):“ umbenannt. Die Einstellungen dazu können dem rechten Fenster der Abbildung 51 entnommen werden. Dabei handelt es sich um die jeweiligen Grenzwerte der fußläufigen Erreichbarkeit pro Polygonfeature (im Falle der Haltestellen: Entfernungen bis 400 Meter, bis 800 Meter und über 800 Meter). Die Umbenennung führt später zu einer besseren Lesbarkeit, wenn beim Anklicken eines bestimmten Steuerpolygons im Pop-up-Fenster der finalen Ergebniskarte entsprechende Informationen aufgerufen werden.

Zusätzlich zur Umbenennung eines bestehenden Attributs mussten mit dem Tool „Add Fields (multiple)“ zwei weitere hinzugefügt werden (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut“). Die genauen Einstellungen dazu lassen sich im linken Fenster der Abbildung 52 einsehen. Zum einen wurde das Attribut „Bedienungshäufigkeit:“ hinzugefügt, anhand dessen später in textlicher Form die Bedienungsqualität der entsprechenden Haltestelle ersichtlich sein wird. Zum anderen wurde das Attribut „Gewichtung der Haltestelle:“ im Datenformat „Double“ erzeugt, um dort den passenden Gewichtungsfaktor einzutragen. Auf Letzteren wird am Ende dieses Unterkapitels im Detail eingegangen.

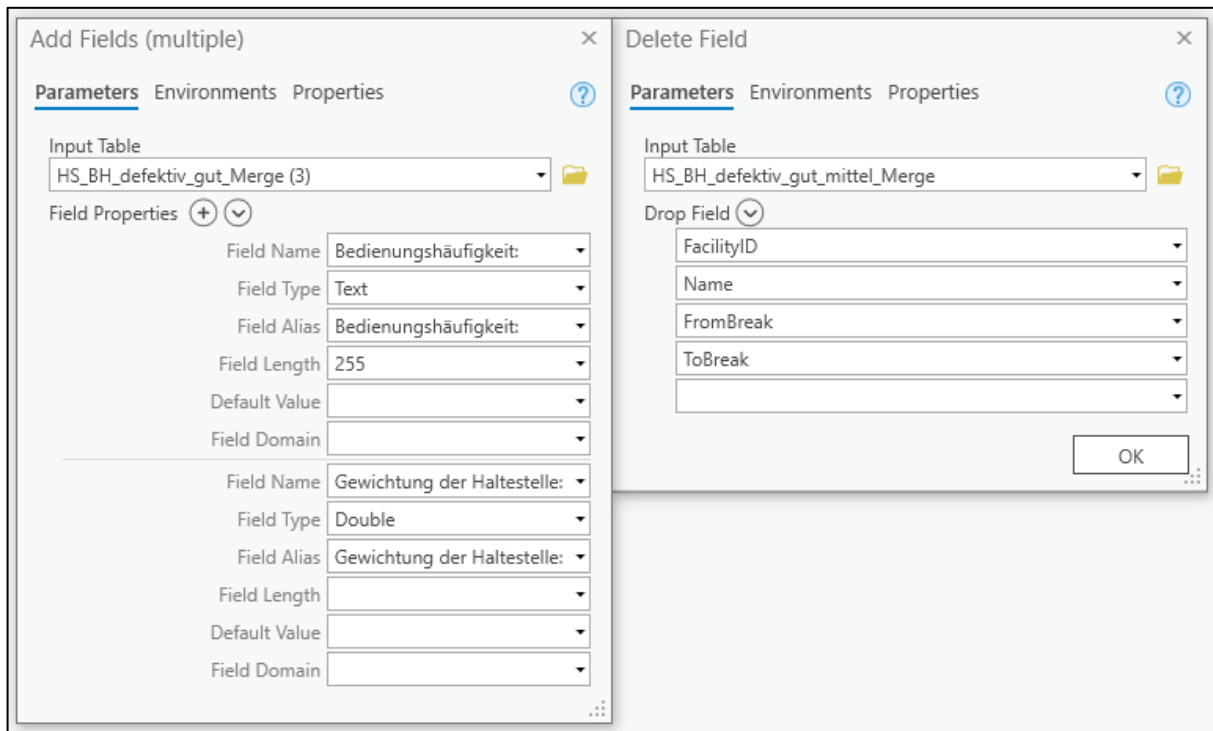


Abb. 52: Einstellungsfenster der Tools „Add Fields (multiple)“ und „Delete Field“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Im nächsten Schritt musste die dritte Ebene von oben (die Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität) von der darüber befindlichen Ebene (die soeben vereinigte Ebene) ausgestanzt werden. Da Haltestellen mit guter Bedienungsqualität in der Regel häufiger aufgesucht werden als Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität (unter Berücksichtigung ähnlicher Entfernungsverhältnissen), mussten letztere von ersteren ausgestanzt und anschließend beide Ebenen wieder zusammengeführt werden. Diese beiden Prozesse wurden nach selbem Prinzip wie zuvor mit den beiden Tools „Erase“ und „Merge“ durchgeführt (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut mittel“). Da bereits nach erfolgter Umbenennung ein Attribut namens „Nächstbeste Haltestelle (m):“ vorhanden ist, musste das nun generierte Attribut (sowie einige weitere überflüssige Standardattribute) mittels „Delete Field“ gelöscht werden (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut mittel“). Das entsprechende Einstellungsfenster kann in der rechten Hälfte der Abbildung 52 eingesehen werden. Die im vorangegangenen Schritt neu hinzugefügten Attribute „Bedienungshäufigkeit:“ sowie „Gewichtung der Haltestelle:“ wurden infolge des Vereinigungsprozesses auch für die neuen Polygonfeatures übernommen.

Die drei Tools „Erase“, „Merge“ und „Delete Field“ wurden auch für die Bearbeitung der untersten Ebene (die Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit schlechter Bedienungsqualität) nach selbem Prinzip wie zuvor angewendet (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut mittel schlecht“).

Nach den bisherigen Schritten waren folgende Objekte in einer gemeinsamen Ebene vorhanden:

- Polygone mit einer Ausdehnung von 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die defektiven Haltestellen.
- Polygone mit einer Ausdehnung von 400 Metern und über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit guter Bedienungsqualität.
- Polygone mit einer Ausdehnung von 400 Metern und über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität.
- Polygone mit einer Ausdehnung von 400 Metern und über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit schlechter Bedienungsqualität.

Mit diesen Polygonen war die ÖV-Komponente der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer allerdings noch nicht flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorhanden. Denn auch alle Regionen, welche sich jenseits des fußläufigen Erreichbarkeitslimits von 800 Metern befinden, mussten mit einem Polygon in die gemeinsame Ebene integriert und entsprechend gewichtet werden. Deshalb wurde die Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets („Landesgrenze Steiermark“) wiederum genau wie zuvor mithilfe der drei Tools „Erase“, „Merge“ und „Delete Field“ einbezogen, indem alle vorher gebildeten Polygone aus der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets ausgestanzt und anschließend mit deren Restfläche vereinigt wurden (siehe Abb. 49, Box „Haltestellen defektiv gut mittel schlecht“).

Jetzt waren alle Daten derart aufbereitet, um den wichtigsten Teil vornehmen zu können: Die Eintragung der Gewichtungswerte für alle Polygone erfolgte in der Attributtabelle beim hinzugefügten Attribut namens „Gewichtung der Haltestelle:“. Tabelle 3 in Kapitel „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ gibt Aufschluss über alle in dieser Masterarbeit herangezogenen Gewichtungswerte. In diesem Zusammenhang ist jedoch hervorzuheben, dass die in der Literatur angeführten Werte nicht identisch für die Haltestellenpolygone übernommen werden konnten, da sich Zweck und Methodik der entsprechenden Studie von der hier durchgeführten Untersuchung teilweise erheblich unterscheiden. Aus diesem Grund sind deren Gewichtungswerte hinsichtlich des ÖV mehr als Vorlage zu verstehen, aus welcher die eigenen Werte auf angemessene Weise abgeleitet wurden (siehe Tab. 8). Das Verhältnis von 60 zu 40 Prozent bzw. 0,6 zu 0,4 zwischen den beiden Indikatorensets „Öffentlicher Verkehr“ und „Daseinsvorsorge“ wurde unverändert beibehalten. Der 60-Prozent-Anteil im ÖV wurde hingegen folgendermaßen umstrukturiert: Die Polygone mit einer Ausdehnung von 400 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit guter Bedienungsqualität weisen die besten Erreichbarkeits- und Qualitätsverhältnisse im ÖV auf, weshalb sie den vollen Gewichtungsanteil von 0,6 erhielten. Da die Polygone mit einer Ausdehnung von über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit guter Bedienungsqualität im Vergleich zu den vorhergehenden Polygonen doppelt so große Entfernungen aufweisen, wurde ihnen ein halbiertes Gewichtungsanteil von 0,3 zugewiesen. In der angeführten Literatur haben die Zugangsweite und die Bedienungshäufigkeit mit einer Gewichtung von jeweils 0,15 identische Werte erhalten, woraus sich schließen lässt, dass diese beiden Indikatoren eine gleich große Rolle spielen. Diese Erkenntnis wurde auch in der Masterarbeit berücksichtigt, indem die

Werte der nächstgeringeren Qualitätsstufe bei den Haltestellen an die vorigen angeglichen wurden. Konkret bedeutet dies, dass die Polygone mit einer Ausdehnung von 400 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität denselben Gewichtungswert (0,3) wie die Polygone mit einer Ausdehnung von über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit guter Bedienungsqualität erhielten. Wiederum wurde für die Polygone mit einer Ausdehnung von über 400 bis 800 Metern Netzwerkdistanz rund um die Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität der zuvor festgelegte Wert auf 0,15 halbiert. Dieselbe Vorgehensweise wurde auch bei der Zuweisung der Gewichtungswerte für die Polygone der Haltestellen mit schlechter Bedienungsqualität angewendet, sodass sich dort der Wert 0,15 (für eine Netzwerkdistanz bis 400 Meter) bzw. 0,075 (für eine Netzwerkdistanz über 400 bis 800 Meter) ergab.

	Netzwerkdistanz bis 400 Meter	Netzwerkdistanz über 400 bis 800 Meter
Polygone der Haltestellen mit guter Bedienungsqualität	0,6 (voller Gewichtungsanteil)	0,3 (1/2 Gewichtungsanteil)
Polygone der Haltestellen mit mittlerer Bedienungsqualität	0,3 (1/2 Gewichtungsanteil)	0,15 (1/4 Gewichtungsanteil)
Polygone der Haltestellen mit schlechter Bedienungsqualität	0,15 (1/4 Gewichtungsanteil)	0,075 (1/8 Gewichtungsanteil)

Tab. 8: Gewichtungswerte und ihr Verhältnis zueinander in Abhängigkeit von Bedienungsqualität und Erreichbarkeit der Haltestellen (Datengrundlage: SIEDENTOP et al. 2013: 336; eigene Darstellung, 2020)

Die Polygone der defektiven Haltestellen erhielten keinen Wert (bzw. einen NULL-Wert), weil diese ohnehin nicht in die Steuerberechnung miteinfließen. Den Restflächen des Untersuchungsgebiets – also alle Regionen jenseits von 800 Metern Entfernung zu den Haltestellen – wurde hingegen der Wert 0,0 zugewiesen, da ihre unzureichende ÖV-Anbindung eine deutliche Absenkung des später festgelegten Basissteuersatzes bewirken soll.

Nachdem alle genannten Werte in die Attributtabelle der Haltestellenpolygone eingetragen wurden, war die Gewichtung letzterer abgeschlossen. Außerdem konnte anhand der Haltestellengewichtungen eine weitere Antwort auf die Forschungsfrage geliefert werden, wie sich das räumliche Angebot des öffentlichen Verkehrs in messbare Größen transformieren lässt.

9.3.2. Daseinsvorsorge

Die Gewichtung der Daseinsvorsorge erfolgte nach anderem Prinzip als jene der Haltestellen, weil die vier Einrichtungstypen (Supermärkte, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken) im Gegensatz zu den Haltestellenklassen keine hierarchische Überlappung erforderten. Denn während die Erreichbarkeitspolygone der Haltestellen mit geringer Bedienungshäufigkeit durch jene mit hoher Bedienungshäufigkeit im sich überlagernden Einzugsgebiet substituiert werden, ergänzen sich die verschiedenen Einrichtungstypen der Daseinsvorsorge. Grund dafür ist, dass bei der ÖV-Anbindung tendenziell die nächstbeste Haltestelle aufgesucht wird, wohingegen bei der Daseinsvorsorge möglichst viele Einrichtungstypen in möglichst geringer Entfernung erwünscht sind.

Für alle vier Einrichtungstypen wurden dieselben Prozessschritte durchgeführt, weshalb diese am Beispiel der Supermärkte stellvertretend für alle Einrichtungstypen erläutert werden. In

Abbildung 53 sind die entsprechenden Modellausschnitte mit allen eingesetzten Geoverarbeitungswerkzeugen ersichtlich.

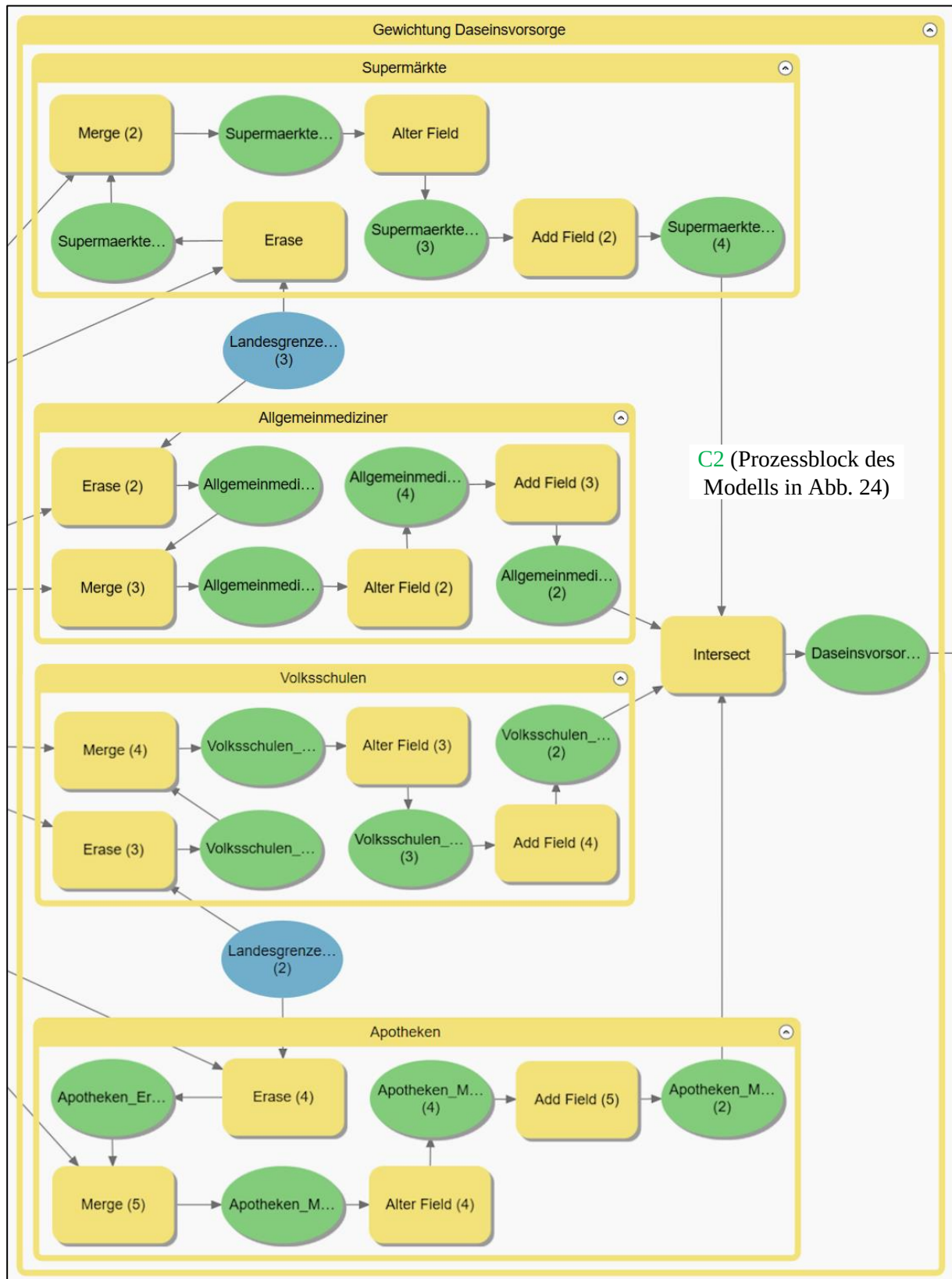


Abb. 53: Gewichtung der Daseinsvorsorge in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Wie in Kapitel „9.2.3. Daseinsvorsorge“ geschildert, wurden die Erreichbarkeitspolygone pro Einrichtungstyp bereits zuvor in zwei Distanzintervalle (im Falle der Supermärkte Entfernungen bis 500 Meter sowie über 500 bis 1.000 Meter) geteilt, extrahiert und für die weitere Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Diese Polygone mussten nun aus der gesamten Fläche des Untersuchungsgebiets mittels „Erase“ (siehe Abb. 53, Box „Supermärkte“) herausgestanzt werden. Die steirische Restfläche umfasste dann alle Gebiete jenseits der höchsten akzeptablen Fußdistanz, sodass schlussendlich pro Einrichtungstyp flächendeckend jene Polygone mit der guten, mittleren und schlechten Erreichbarkeit vorhanden waren. Im Falle der Supermärkte ergaben sich somit die drei Polygonklassen mit Entfernungen bis 500 Meter, über 500 bis 1.000 Meter sowie über 1.000 Meter. Durch die anschließende Verwendung des Tools „Merge“ (siehe Abb. 53, Box „Supermärkte“) konnten alle Polygonklassen wiederum zu einem gemeinsamen Layer zusammengesetzt werden.

Danach wurde das standardmäßig erstellte Attribut „Name“ anhand des Tools „Alter Name“ (siehe Abb. 53, Box „Supermärkte“) in „Nächster Supermarkt (m):“ umbenannt. Das wichtigste Attribut mit der Bezeichnung „Gewichtung des Supermarktes:“ wurde hingegen mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „Add Field“ (siehe Abb. 53, Box „Supermärkte“) als neue Spalte in den Datensatz hinzugefügt. Die entsprechenden Parameter dazu können im linken Einstellungsfenster der Abbildung 54 eingesehen werden.

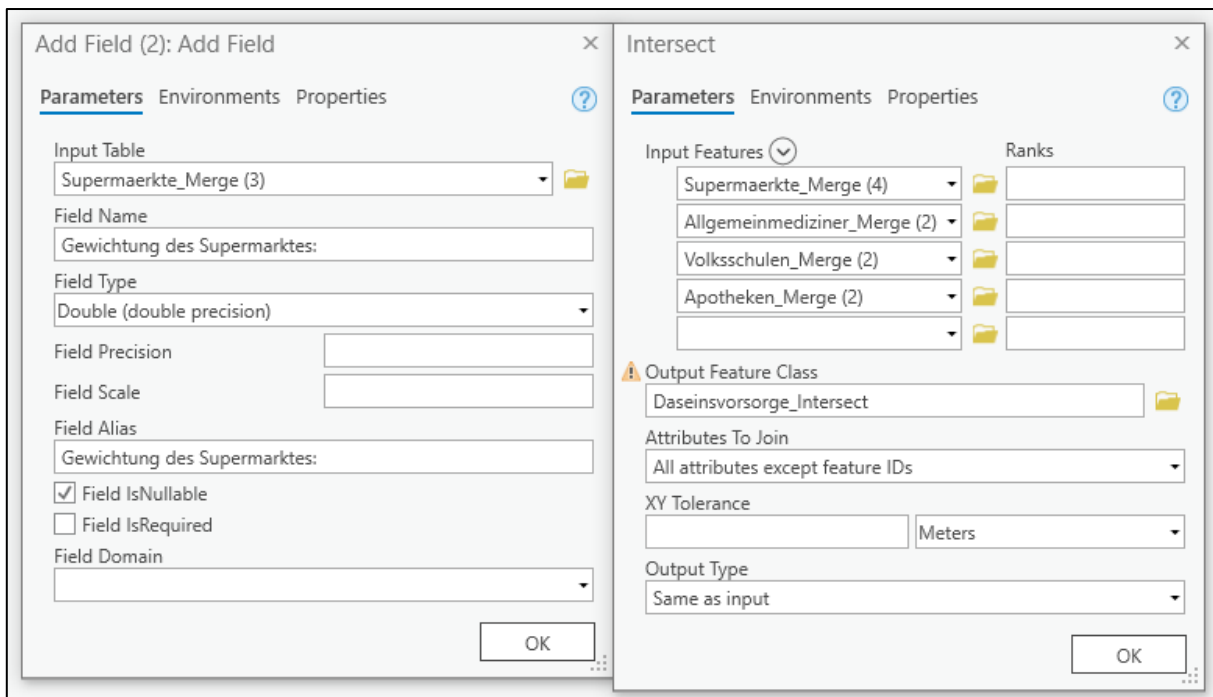


Abb. 54: Einstellungsfenster der Tools „Add Field“ und „Intersect“ (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Neben der neuen Attributbezeichnung ist in diesem Einstellungsfenster auch der Datentyp „Double“ für Gleitkommazahlen vermerkt und darüber hinaus wurde festgelegt, dass in der Attributspalte auch NULL-Werte zulässig sind.

Nach Abschluss der vier genannten Prozessschritte wurden die beiden neuen Attribute der zugehörigen Attributtabelle mit den notwendigen Informationen hinterlegt. Das Attribut „Nächster Supermarkt (m):“ erhielt pro Polygonklasse die passende Entfernungsangabe und

das Attribut „Gewichtung des Supermarktes:“ erhielt pro Polygonklasse den passenden Gewichtungswert. Die theoretische Grundlage zu den Gewichtungswerten kann in Tabelle 3 des Kapitels „6.3. Quantifizierung der Autoabhängigkeit“ eingesehen werden. Dort ist auch veranschaulicht, dass die Summe aller vier Gewichtungswerte der Daseinsvorsorge 40 Prozent bzw. 0,4 ergibt, während der restliche Anteil von 60 Prozent bzw. 0,6 den Haltestellenklassen zugewiesen wurde.

Grundsätzlich wurden die in der Publikation angeführten Gewichtungswerte unverändert für die hier bearbeiteten Einrichtungstypen herangezogen. Da diese aber jeweils zwei Distanzintervalle bzw. Erreichbarkeitsklassen aufweisen, mussten die Gewichtungswerte für die geringere Erreichbarkeit halbiert werden (siehe Tab. 9), was dem Prinzip der Haltestellengewichtungen entspricht. Wie bei den Haltestellenpolygonen, welche sich jenseits der maximalen Fußdistanz befinden, wurde auch den schlecht bzw. nicht erreichbaren Einrichtungspolygonen der Gewichtungswert 0,0 zugewiesen.

	Gute Erreichbarkeit (voller Gewichtungsanteil)	Mittlere Erreichbarkeit (halber Gewichtungsanteil)
Supermärkte	0,15 (bis 500 Meter)	0,075 (über 500 bis 1.000 Meter)
Allgemeinmediziner	0,08 (bis 800 Meter)	0,04 (über 800 bis 1.200 Meter)
Volksschulen	0,12 (bis 1.000 Meter)	0,06 (über 1.000 bis 2.000 Meter)
Apotheken	0,05 (bis 800 Meter)	0,025 (über 800 bis 1.200 Meter)

Tab. 9: Gewichtungswerte in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit pro Einrichtungstyp der Daseinsvorsorge (Datengrundlage: SIEDENTOP et al. 2013: 336; eigene Darstellung, 2020)

Nachdem die bisher erläuterte Vorgehensweise ebenso für die Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken angewendet wurde, mussten alle Datenebenen mithilfe des Tools „Intersect“ überschritten werden (siehe Abb. 53 und rechtes Einstellungsfenster der Abb. 54). Dadurch konnten die Gewichtungswerte von sich überlagernden Polygonen der Daseinsvorsorge addiert werden. Zur besseren Verständlichkeit wird nachfolgend eine konkrete Situation erläutert: Ein Hauptwohnsitz befindet sich am Rand einer Kleinstadt, wo bestimmte Erreichbarkeitsverhältnisse in der Daseinsvorsorge bestehen. Der nächstgelegene Supermarkt befindet sich in einer Entfernung von maximal 500 Meter, was einem Gewichtungswert von 0,15 entspricht. Der nächstgelegene Allgemeinmediziner befindet sich in einer Entfernung von über 800 bis 1.200 Meter, was einem Gewichtungswert von 0,04 entspricht. Die nächstgelegene Volksschule befindet sich in einer Entfernung von über 2.000 Meter, was einem Gewichtungswert von 0,0 entspricht. Die nächstgelegene Apotheke befindet sich in einer Entfernung von über 800 bis 1.200 Meter, was einem Gewichtungswert von 0,025 entspricht. Demzufolge befindet sich der betroffene Hauptwohnsitz im Überschneidungsbereich von vier Erreichbarkeitspolygonen, deren Gewichtungswerte in Summe 0,215 ergeben. Damit jedoch diese Summe einem eigenen räumlichen Ausschnitt zugewiesen werden kann, muss der Überschneidungsbereich aller vier Erreichbarkeitspolygone als neues Polygon gebildet werden (siehe Abb. 55). Genau diesen Zweck erfüllt das bereits genannte Tool „Intersect“: Es generiert aus allen Überschneidungsbereichen der Erreichbarkeitspolygone neue Polygone (siehe Abb. 55), die dann mit einem aufsummierten Gewichtungswert ausgestattet werden können.

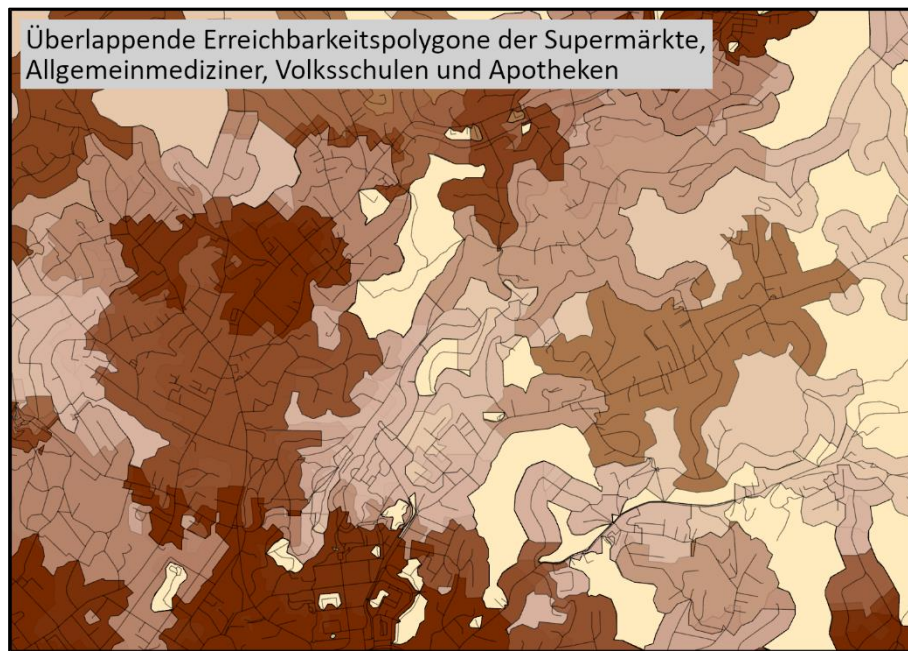


Abb. 55: Überlappende Erreichbarkeitspolygone der Daseinsvorsorge (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2021)

Das Resultat ist ein neuer Polygonlayer mit den endgültigen Gewichtungswerten der Daseinsvorsorge, welcher aus geometrischen Gründen eine räumliche Ausdehnung von exakt der Fläche des Untersuchungsgebiets aufweist. Als logische Konsequenz daraus ergibt sich, dass die gesamte Bandbreite der aufsummierten Gewichtungswerte von 0,0 (jenseits der fußläufigen Maximaldistanz zu allen vier Einrichtungstypen) bis 0,4 (optimale Erreichbarkeitsverhältnisse zu allen vier Einrichtungstypen) reicht.

Nachdem alle genannten Werte in die Attributtabelle der Daseinsvorsorgepolygone eingetragen wurden, war die Gewichtung letzterer abgeschlossen. Außerdem konnte anhand der Daseinsvorsorgegewichtungen eine weitere Antwort auf die Forschungsfrage geliefert werden, wie sich die fußläufige Erreichbarkeit essenzieller Einrichtungen des täglichen Bedarfs in messbare Größen transformieren lässt.

9.4. Steuerberechnungen

Im Laufe der bisherigen Prozessphasen wurden die Quelldatensätze so verarbeitet, dass am Ende zwei Polygonlayer herauskamen:

- Die Polygone des ersten Layers (ÖV) wurden durch Substitution sich überlappender Flächenanteile gebildet und erhielten daher jeweils den höchsten Gewichtungswert aller sich überlappender Flächenanteile. Folglich reicht das daraus resultierende Wertespektrum von 0,0 bis 0,6.
- Die Polygone des zweiten Layers (Daseinsvorsorge) sind hingegen durch Überschneidung sich überlappender Flächenanteile sowie der Aufsummierung ihrer jeweiligen Gewichtungswerte entstanden. Das daraus resultierende Wertespektrum reicht daher von 0,0 bis 0,4.

Zweck der letzten Prozessphase war es, diese beiden Polygonlayer miteinander zu verschneiden und die endgültigen Gewichtungswerte durch Addition zu ermitteln. Anschließend mussten Letztere noch mit haushaltsbezogenen Faktoren (unter der Annahme eines konkreten Haushaltsbeispiels) sowie einem Basissteuersatz multipliziert werden, um als Endergebnis eine Karte mit differenzierten Steuerpolygonen für den herangezogenen Haushalt zu erhalten. Dieser Ablauf wird nachfolgend detaillierter beschrieben sowie in Abbildung 56 veranschaulicht.

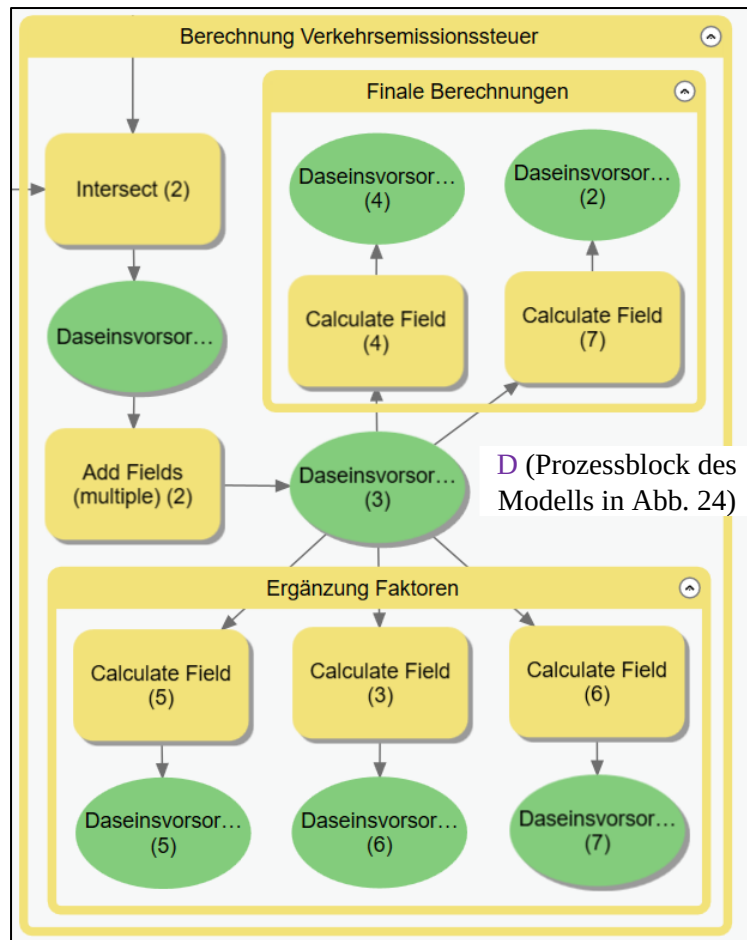


Abb. 56: Berechnung der Verkehrsemissionssteuer in Modellansicht (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Während also die fusionierten Polygonlayer samt ihren Gewichtungssummen eine konstante geometrische Basis darstellen, die für alle Untersuchungsfälle insgesamt nur einmal berechnet werden muss, sind die haushaltsbezogenen Faktoren (Anzahl der gemeldeten PKW und Personen mit eingeschränkter Mobilität) als anwendungsabhängige Variablen zu verstehen. Der Basissteuersatz ist wiederum eine Konstante, die als einheitliche Bemessungsgrundlage für alle zu untersuchenden Haushalte dient. Aus ihrer Multiplikation mit den Gewichtungswerten und haushaltsbezogenen Faktoren resultiert dann die monatliche Verkehrsemissionssteuer für den jeweiligen Anwendungsfall. Somit lässt sich daraus folgende Formel zur steuerlichen Berechnung ableiten:

$$(\text{Gewichtung Haltestellen} + \text{Gewichtung Daseinsvorsorge}) \times \text{Anzahl der PKW} \times \text{Gewichtung mobil eingeschränkter Personen} \times \text{Basissteuersatz} = \underline{\text{monatliche Verkehrsemissionssteuer}}$$

Zur Veranschaulichung ein Beispiel: Ein Haushalt befindet sich in einem Polygon, das durch bestimmte Erreichbarkeitsverhältnisse im ÖV sowie in der Daseinsvorsorge charakterisiert ist. Außerdem bestehen bestimmte haushaltsbezogene Merkmale.

- Die nächstgelegene Haltestelle weist eine hohe Bedienungshäufigkeit und eine Netzwerkdistanz bis 400 Meter auf (Gewichtung 0,6).
- Der nächstgelegene Supermarkt weist eine Netzwerkdistanz von über 500 bis 1.000 Meter auf (Gewichtung 0,075).
- Der nächstgelegene Allgemeinmediziner weist eine Netzwerkdistanz von über 0 bis 800 Meter auf (Gewichtung 0,08).
- Die nächstgelegene Volksschule weist eine Netzwerkdistanz von über 1.000 bis 2.000 Meter auf (Gewichtung 0,06).
- Die nächstgelegene Apotheke weist eine Netzwerkdistanz von über 0 bis 800 Meter auf (Gewichtung 0,05).
- Es ist ein PKW gemeldet (Faktor 1).
- Es sind keine Personen mit eingeschränkter Mobilität gemeldet (Faktor 1).
- Der Basissteuersatz beträgt aktuell € 45,00.

Für den beschriebenen Haushalt ergibt sich folgende monatliche Verkehrsemissionssteuer:

$$(0,6 + 0,075 + 0,08 + 0,06 + 0,05) \times 1 \times 1 \times € 45,00 = \underline{\underline{€ 38,92}}$$

Falls der Hauptwohnsitz so abgelegen liegt, dass sich keine Haltestelle (Gewichtung 0), kein Supermarkt (Gewichtung 0), kein Allgemeinmediziner (Gewichtung 0), keine Volksschule (Gewichtung 0) und keine Apotheke (Gewichtung 0) in fußläufiger Reichweite befindet, so würde die monatliche Verkehrsemissionssteuer – unabhängig von allen anderen Faktoren – auf € 0,00 sinken. Dieser Haushalt wäre dann von der Steuer befreit, weil er eine stark ortsspezifische Autoabhängigkeit aufweisen würde.

Falls an dem Hauptwohnsitz kein PKW gemeldet wäre (Faktor 0), so würde die monatliche Verkehrsemissionssteuer – unabhängig von allen anderen Faktoren – auf € 0,00 sinken. Dieser Haushalt wäre dann von der Steuer befreit, weil er keinen PKW gemeldet hat. Im Falle zwei gemeldeter PKW (Faktor 2) würde die Steuer jedoch doppelt so hoch wie in obiger Rechnung ausfallen. Der PKW-Faktor ist somit gleichzusetzen mit der Anzahl der gemeldeten PKW.

Falls dort Personen mit eingeschränkter Mobilität gemeldet wären (Faktor < 1), so würde die monatliche Verkehrsemissionssteuer in Abhängigkeit der genauen Umstände (z. B. Anzahl der Personen mit eingeschränkter Mobilität und Schweregrad ihrer Behinderung) reduziert werden oder eventuell gänzlich wegfallen. Dieser Faktor kann demzufolge von 0 bis 1 reichen.

Die Berechnungsweise wurde in ArcGIS Pro folgendermaßen umgesetzt: Zuerst mussten die beiden eingangs genannten Layer mithilfe des Geoverarbeitungswerkzeuges „Intersect“ überschritten werden (siehe Abb. 56, Box „Berechnung Verkehrsemissionssteuer“). Dies erfolgte nach demselben Prinzip wie bereits im vorangegangenen Kapitel geschildert: Es wurden jene Polygonanteile, die sich räumlich überlappten, zu neuen Polygonen zusammengefügt und dabei auch ihre jeweiligen Attribute samt Werten übernommen. Die dadurch erzeugte Polygonlandschaft wurde im Vergleich zu den ursprünglichen Layern noch kleinteiliger, weil die räumlichen Informationen beider Komponenten (ÖV und Daseinsvorsorge) miteinander kombiniert und folglich weiter ausdifferenziert wurden.

Die entstandene Attributtabelle, in welche die Attribute und Werte aller neuen Polygone bzw. Features integriert wurden, musste noch um einige Attribute erweitert werden, was mithilfe des Tools „Add Fields (multiple)“ umgesetzt wurde (siehe Abb. 56, Box „Berechnung Verkehrsemissionssteuer“). Wie man im Einstellungsfenster der Abbildung 57 sieht, handelte es sich dabei um die Gewichtungssumme der Einrichtungen, die Anzahl der PKW, die Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen, den Basissteuersatz in Euro sowie die monatliche Verkehrsemissionssteuer. Bezugnehmend auf diese Attribute wird jene Forschungsfrage ergänzend beantwortet, die sich mit der Integration geeigneter Parameter in der Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer befasst. Die schrittweise Berechnung ihrer einzelnen Werte bildete den Abschluss der praktischen Ausarbeitung und lieferte somit die Endergebnisse.

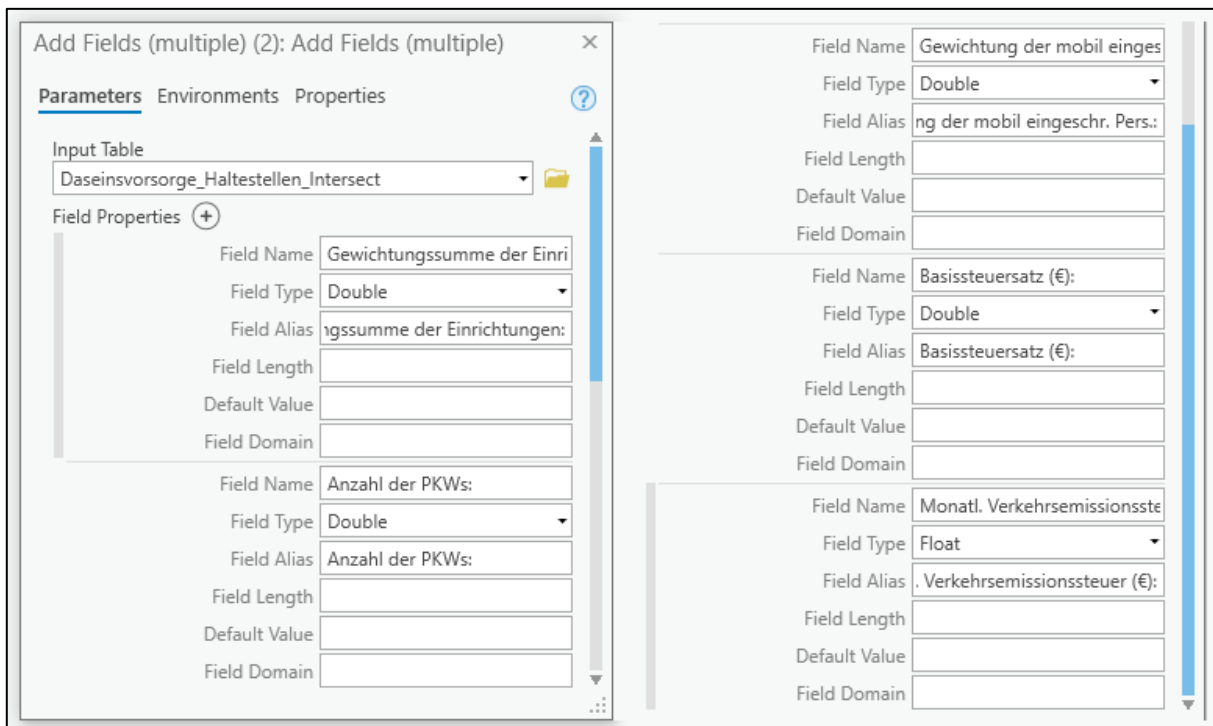


Abb. 57: Einstellungsfenster des Tools „Add Fields (multiple)“ zur Bereitstellung aller Attribute, die für die steuerliche Berechnung benötigt werden (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Das erste Attribut – die Gewichtungssumme der Einrichtungen – wurde anhand des Geoverarbeitungswerkzeuges „Calculate Field“ bearbeitet (siehe Abb. 56, Box „Finale Berechnungen“, und linkes Einstellungsfenster der Abb. 58). Die Features des finalen Polygonlayers umfassten zwar bereits alle festgelegten Gewichtungswerte der Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge, aber noch nicht deren Summe, welche letztendlich zur Bemessung des Steuersatzes pro Polygon herangezogen werden sollte. Deshalb wurden jene Einzelgewichtungen addiert, woraus sich unter allen Features ein feingegliedertes Wertespektrum von 0,0 (unzureichende fußläufige Erreichbarkeit von Haltestellen, Supermärkten, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken) bis 1,0 (optimale fußläufige Erreichbarkeit von Haltestellen, Supermärkten, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken) folgte. Durch die Methode „Reclassify“ und den Befehl „Insert Values“ konnte das bereits bestehende Attribut mit den neuen Summenwerten ausgestattet werden.

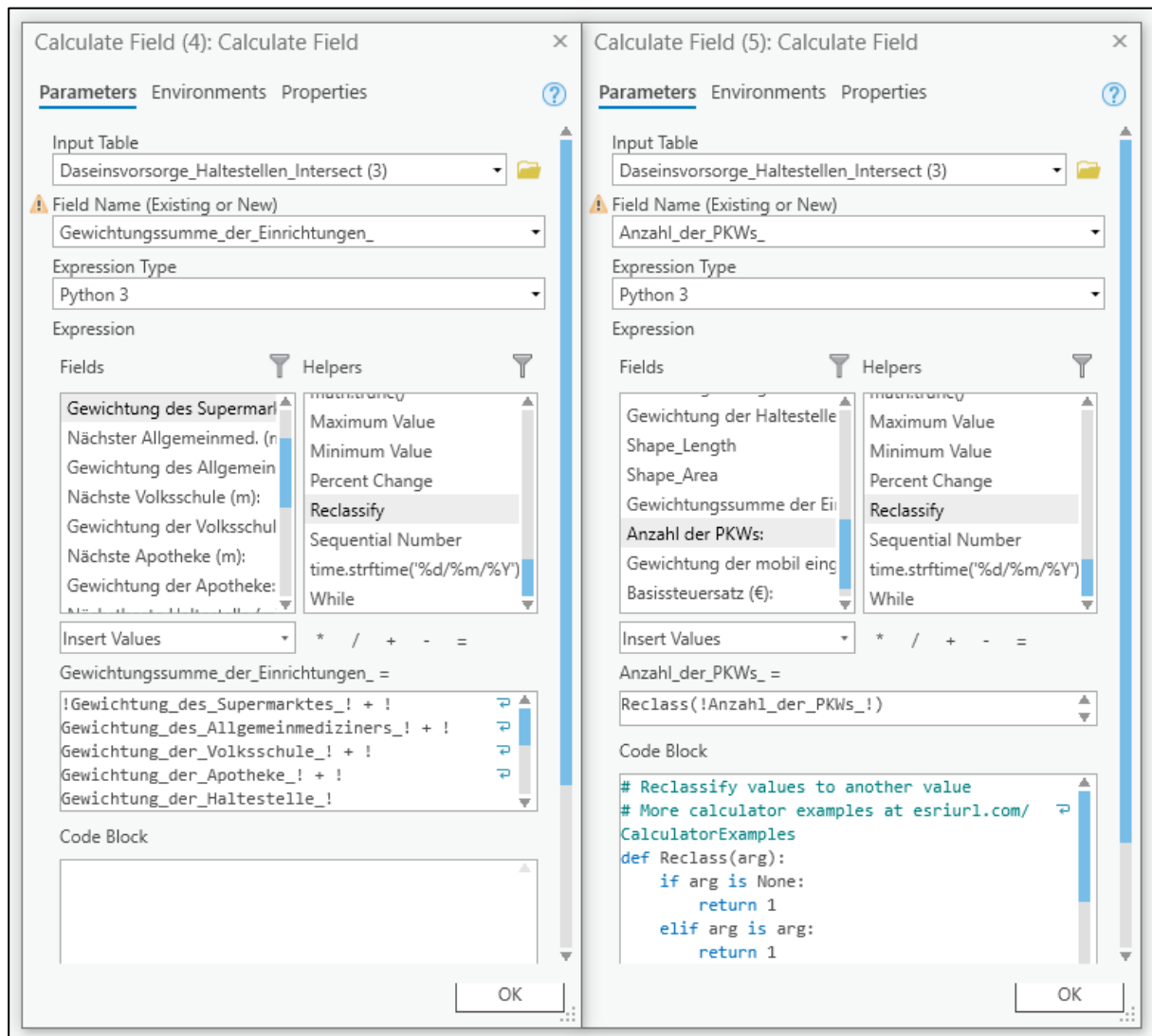


Abb. 58: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Berechnung der Gewichtungssumme der Einrichtungen und Anzahl der PKW (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Das zweite Attribut – die Anzahl der PKW – wurde auch mit „Calculate Field“ bearbeitet, wie man in Abbildung 56 (Box „Ergänzung Faktoren“) sowie im rechten Einstellungsfenster der Abbildung 58 sehen kann. Da die netzwerkbasierte Verkehrsemissionssteuer für jeden PKW, der an einem gegebenen Wohnsitz gemeldet ist, anfällt, entsprechen die Werte dieses Attributs exakt der Anzahl der PKW. Um die beispielhaften Berechnungen im Rahmen der Masterarbeit so einfach wie möglich zu demonstrieren, wurde hier der Wert 1 (also ein PKW pro Haushalt) gewählt. Dieser Wert konnte mit einem Python-Ausdruck für alle Features generiert werden.

Das dritte Attribut – die Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen – wurde erneut mit dem Tool „Calculate Field“ bearbeitet (siehe Abb. 56, Box „Ergänzung Faktoren“, und linkes Einstellungsfenster der Abb. 59). Es ist pro Haushalt bzw. Hauptwohnsitz durch einen Faktor zwischen 0,0 und 1,0 gekennzeichnet, welcher in Abhängigkeit von den dort wohnsässigen Personen mit physisch bedingten Mobilitätseinschränkungen festzulegen ist. Da dieser Faktor jedoch Gegenstand soziodemographischer Untersuchungen ist und im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit mit GIS-Schwerpunkt nicht näher behandelt werden soll, fließt er mit einem neutralen Wert in die Steuerberechnungen ein. Durch die Multiplikation von 1,0 mit

den anderen Faktoren ist sichergestellt, dass mobil eingeschränkte Personen keinen Einfluss auf die Berechnungen ausüben. Theoretisch besteht aber jederzeit die Möglichkeit, diesen Wert zu reduzieren und dadurch steuerliche Begünstigungen für diese benachteiligten Bevölkerungsgruppen zu erzielen. Auch dieser Wert konnte mithilfe eines Python-Ausdrucks einheitlich für alle Features generiert werden.

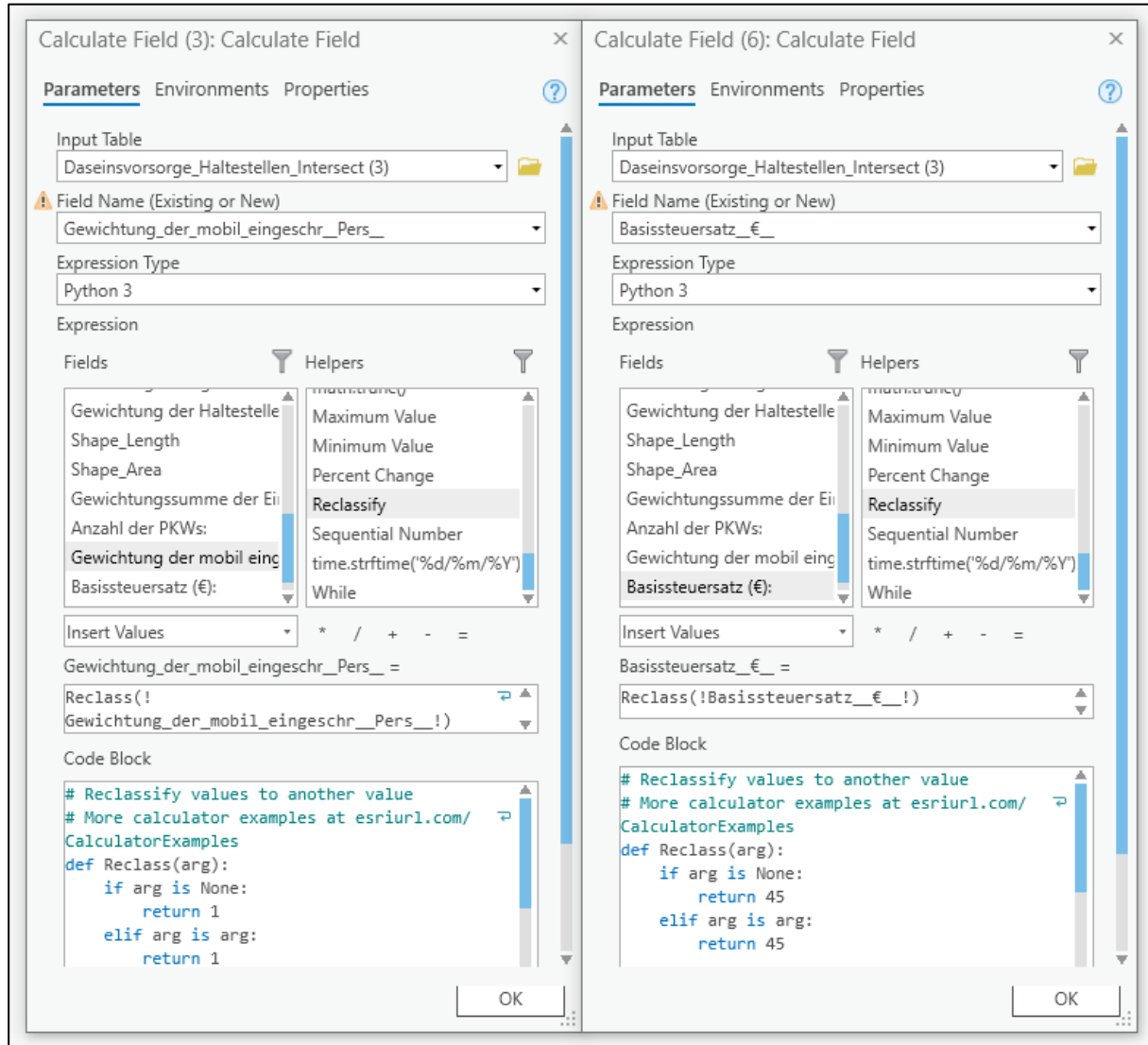


Abb. 59: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen und Berechnung des Basissteuersatzes (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

Das vierte Attribut – der Basissteuersatz in Euro – floss als konstanter Wert in die Berechnungen ein, was in Abbildung 56 (Box „Ergänzung Faktoren“) sowie im rechten Einstellungsfenster der Abbildung 59 genauer eingesehen werden kann. Durch seine Multiplikation mit den netzwerkbedingten und haushaltsbezogenen Faktoren ergeben sich dann die individuellen Steuersätze. Dieser Basissteuersatz wurde anhand eines Python-Ausdrucks mit dem Wert 45 für alle Features festgesetzt. Wie in Kapitel „3.2.2. Steuern im MIV“ nachgelesen werden kann, wurden in Österreich im Jahr 2018 für die motorbezogene Versicherungssteuer pro Monat durchschnittlich 44,88 Euro bezahlt. Gerundet entspricht dieser Betrag dem hier festgelegten Basissteuersatz.

Das fünfte und somit letzte Attribut – die monatliche Verkehrsemissionssteuer – bildete das rechnerische Endergebnis der praktischen Ausarbeitung und resultierte aus der Multiplikation aller vier zuvor definierten Faktoren (siehe Abb. 56, Box „Finale Berechnungen“, und Abb. 60). Die Gewichtungssumme der Einrichtungen, die Anzahl der gemeldeten PKW und die Gewichtung der mobil eingeschränkten Personen ergeben zusammen einen Wert zwischen 0,0 und 1,0. Aus ihrer Multiplikation mit dem Basissteuersatz konnte daher für jedes Polygon ein endgültiger Steuerbetrag zwischen 0,00 und 45,00 Euro ermittelt werden. Angenommen ein Hauptwohnsitz bzw. Haushalt befindet sich in fußläufiger Nähe zu hochrangigen Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge (Wert strebt gegen 1), verfügt über zwei PKW (Wert 2) und beherbergt keine Personen mit eingeschränkter Mobilität (Wert 1), so wird dessen Verkehrsemissionssteuer monatlich (nahezu) 90 Euro betragen. Umgekehrt wird dieser Steuersatz mit nur wenigen Euro pro Monat bemessen oder gar komplett wegfallen, sofern der Hauptwohnsitz bzw. Haushalt in weiter Ferne zu Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge gelegen ist (Wert strebt gegen 0) und/oder über keinen PKW verfügt (Wert 0) und/oder Personen mit eingeschränkter Mobilität beherbergt (Wert strebt gegen 0).

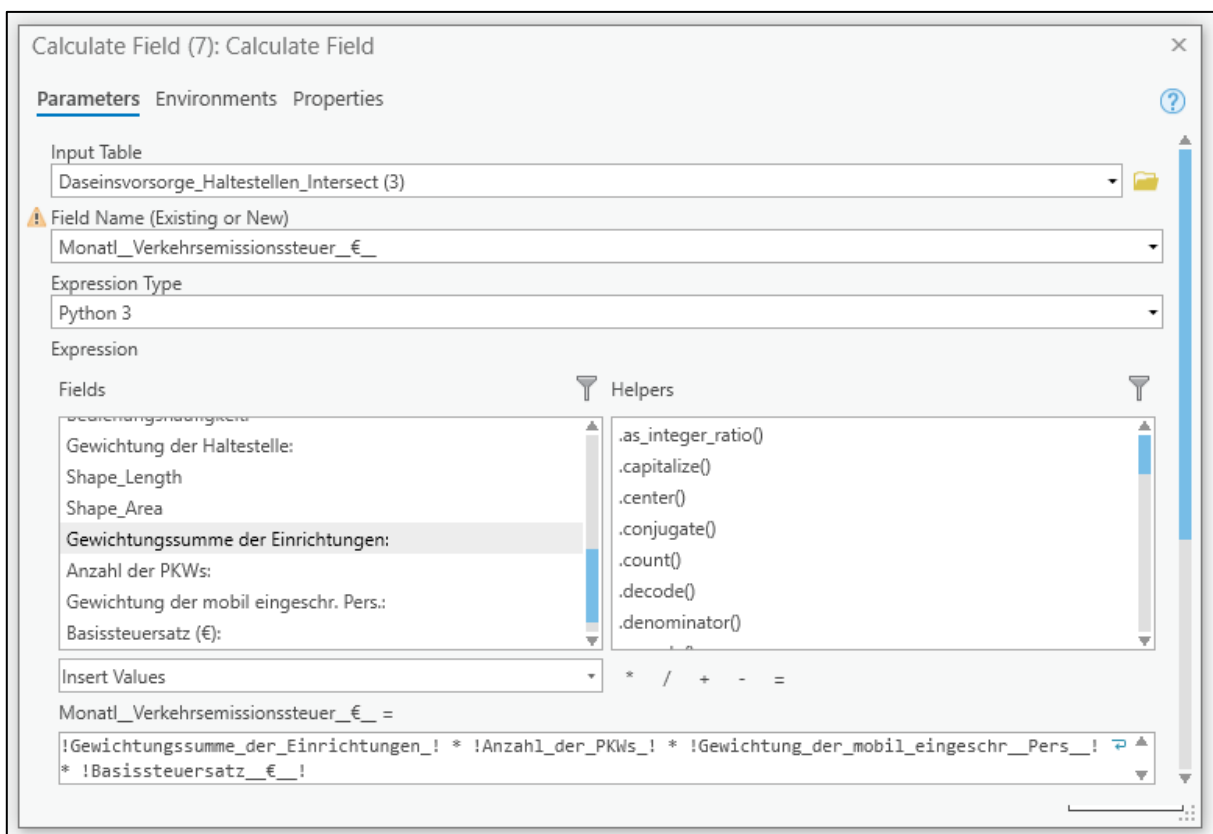


Abb. 60: Einstellungsfenster des Tools „Calculate Field“ zur Berechnung der monatlichen Verkehrsemissionssteuer (Screenshot: ArcGIS Pro ModelBuilder; eigene Darstellung, 2020)

9.5. Automatisierung

Im Rahmen der Masterarbeit wurde unter anderem die Fragestellung behandelt, wie sich ein (teil-)automatisierter Programmablauf sowie die nachträgliche Anpassung der gesetzten Parameter bewerkstelligen lässt. Diese Untersuchung erfolgte mithilfe des ArcGIS Pro

ModelBuilders, welcher eine graphische Strukturierung und jederzeitige Bearbeitung der herangezogenen Datensätze und Prozesse zulässt.

Im Laufe der praktischen Ausarbeitung musste festgestellt werden, dass jene Automatisierung durch den standardmäßigen Einsatz des ModelBuilders – also ohne die Zuhilfenahme von zusätzlicher Programmierung – nur teilweise und nicht gänzlich ohne manuelle Eingriffe zu sinnvollen Ergebnissen führt. Dafür sind mehrere Gründe ausschlaggebend:

- Bei umfangreichen Modellen – wie im Falle dieser Masterarbeit – können Prozessabläufe vorkommen, die nichtlinear strukturiert sind. Aufgrund ihrer parallelen oder iterativen Abarbeitung können Datenkollisionen bzw. rechnerische Blockaden auftreten, die bei vollautomatisierten Durchläufen zu Fehlermeldungen führen. Als Beispiele für parallele Prozessabfolgen seien hier die Netzwerkanalysen und Gewichtungen genannt, welche für die Haltestellen und die Einrichtungen der Daseinsvorsorge getrennt voneinander durchgeführt werden mussten, da es sich um unterschiedliche Berechnungsmethoden handelte. Deren verarbeitete Daten stammten jedoch teilweise von gemeinsamen Quelldatensätzen und mussten ab einem bestimmten Prozessschritt wieder zusammengeführt werden. Dies erforderte eine Aufspaltung der Programmstränge, die mit unterschiedlichem Rechenaufwand abgearbeitet werden mussten, sodass einer der beiden Stränge zwangsläufig schneller als der andere zum Vereinigungsschritt gelangte. Da jedoch die Inputdaten des langsameren Prozessstranges noch nicht zur Verfügung standen, resultierte der schnellere Prozessstrang in einer Fehlermeldung. Ähnlich verhält es sich mit iterativen Programmabläufen, wie beispielsweise bei den einzelnen Netzwerkanalysen. Dort musste zuerst ein sogenannter Service Area Analysis Layer (eine Datenebene für das zu analysierende Einzugsgebiet) aus dem Network Dataset (das Straßen- und Wegenetz) erstellt werden, bevor die Locations (die Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge) in diesen Layer importiert werden konnten. Allerdings war nach ihrem Import ein erneutes Aufrufen des Service Area Analysis Layer notwendig, um dort mit den gesetzten Parametern die Netzwerkanalyse zu starten. Der ModelBuilder bietet aber standardmäßig keine Möglichkeit, eine Prozessschleife bei erfüllter Bedingung zu beenden und den nächsten Bearbeitungsschritt einzuleiten – eine Fehlermeldung ist die Folge.
- Im Zuge der Netzwerkanalysen müssen Anpassungen von Parametern erfolgen, die von der Beschaffenheit der herangezogenen Datensätze abhängen und deshalb eine Begutachtung der Zwischenergebnisse erfordern, bevor mit weiteren Prozessen fortgefahren werden kann. Dazu zählt etwa die Definition der „Search Tolerance“, welche bei den Netzwerkanalysen anhand des Tools „Add Location“ eingestellt wird (siehe Kap. „9.2.2. ÖV-Haltestellen“ und „9.2.3. Daseinsvorsorge“). Dabei handelt es sich um die maximale Distanz, welche die Haltestellen bzw. Einrichtungen der Daseinsvorsorge zum Netzwerk haben dürfen, um überhaupt in die Netzwerkanalysen einbezogen zu werden. Der optimale Wert ergibt sich aus einem manuellen Annäherungsverfahren, welches die beste Balance zwischen möglichst kurzer Distanz zum Netzwerk und möglichst wenig auszuschließenden Features herstellt. Ein weiteres Beispiel für die interagierende Anpassung von Parametern ist das Network Dataset, dessen Routingregeln via Rechtsklick auf den Datensatz im Catalog und Öffnen des Einstellungsmenüs für den jeweiligen Anwendungsfall justiert werden mussten. Da das Network Dataset allerdings erst nach einigen erfolgten Prozessen generiert wird (und dann erst die erwähnten Einstellungen erfordert), erweist sich auch hier ein vollautomatisierter Programmdurchlauf als problematisch.

- In den meisten Fällen wird es nicht notwendig oder erwünscht sein, vor einem erneuten Programmdurchlauf alle Einstellungen und Werte zu korrigieren, sondern eine Reihe grundlegender Prozesse unverändert beizubehalten. Doch durch einen vollautomatisierten Durchlauf werden alle Prozessschritte nochmals ausgeführt sowie bereits erstellte Shapefiles überschrieben, sofern ihre Namen mit jenen der neuen Output-Datensätze identisch sind. Dies mündet nicht nur in unnötigem Rechenaufwand, sondern kann auch zu Fehlermeldungen oder gar zum Verlust wertvoller Daten führen.

Als positiv ist hervorzuheben, dass der automatisierte Programmdurchlauf im ModelBuilder bei geschickter Aufteilung in mehrere kleinere Programmabschnitte einwandfrei funktioniert. Denn das schrittweise Ausführen bestimmter Prozessgruppen ermöglicht nicht nur die Einsparung von Rechenaufwand, sondern bietet auch eine bessere Steuerung paralleler oder iterativer Abläufe. Darüber hinaus erhält man als NutzerIn die Gelegenheit, zwischenzeitliche Parametrisierungen in Einstellungsmenüs vorzunehmen, bevor der nächste Programmschritt eingeleitet wird. Doch auch die Vollautomatisierung wäre bei Anwendung entsprechender Python-Ausdrücke oder der FME (Feature Manipulation Engine) vermutlich möglich. Allerdings mussten hier diese Verbesserungen unberücksichtigt bleiben, da sie sonst den Rahmen der Masterarbeit deutlich überschritten hätten.

10. Ergebnisse

Nachdem die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer abgeschlossen war, stand für jedes Polygon eine Reihe an Attributen bzw. Informationen zur Verfügung, die sich optimal mit einer interaktiven Karte veranschaulichen ließen. Dabei wurden flächendeckend für die gesamte Steiermark drei Hauptebenen kartographisch aufbereitet:

- Die oberste Ebene beinhaltet alle Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge, die für die Netzwerkanalysen herangezogen wurden. Die Haltestellen sind in drei Klassen gruppiert, deren Hierarchie aus der Bedienungsqualität abgeleitet ist. Die Größe ihrer Punktsignaturen wächst mit steigender Bedienungshäufigkeit. Darüber hinaus existiert eine vierte Gruppe mit jenen Haltestellen, die defektiv waren und daher nicht in die Berechnung der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer einfließen konnten. Die Einrichtungen der Daseinsvorsorge sind in ihre vier Kategorien „Volksschule“, „Apotheke“, „Supermarkt“ und „Allgemeinmediziner“ gegliedert und mit passenden Signaturen gekennzeichnet.
- Die mittlere Ebene besteht aus dem für die Netzwerkanalyse herangezogenen Netzwerk. Dies sind jene Straßen und Wege, die bereits im Zuge der Datenvorbereitungen auf ihre Fußgängertauglichkeit überprüft und gefiltert wurden. Es handelt sich somit um einen Linienlayer, dessen Segmente Angaben zum Namen, zur Kategorie sowie zur Länge der jeweiligen Straße bzw. des jeweiligen Weges enthalten.
- Die unterste Ebene umfasst die Polygone, welche aus den Netzwerkanalysen bzw. fußläufigen Einzugsgebieten der Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge entstanden. Sie enthalten alle Informationen zu den Bedienungshäufigkeiten, Distanzen, Gewichtungen, haushaltsbezogenen Parametern und steuerlichen Bemessungen. Da das Attribut der finalen Verkehrsemissionssteuer die wichtigste Information darstellt, basiert die Symbologie der Polygone auf diesen Werten. Letztere reichen z. B. bei einem Haushalt mit einem PKW sowie keinen mobil eingeschränkten Personen von 0,00 bis 45,00 Euro pro Monat. Da zwischen dem Minimum und Maximum zahlreiche differenzierte Beträge vorzufinden sind, wurde hier eine kontinuierliche Farbskala gewählt, deren Intensität mit der Steuerhöhe steigt. Jene unbestimmten Polygone, deren Steuer aufgrund defektiver Haltestellen nicht berechnet werden konnte, wurden als solche gekennzeichnet.

Nachfolgend werden die Ergebnisse anhand drei beispielhafter Kartenausschnitte präsentiert, wobei zur besseren Veranschaulichung möglichst diverse Raumtypen in verschiedenen Maßstäben herangezogen wurden. In allen drei Ausschnitten sind zahlreiche räumliche Gesetzmäßigkeiten bzw. Indizien vorzufinden, welche die Korrektheit der methodischen Vorgehensweise und rechnerischen Abläufe bestätigen. Die erste Darstellung zeigt einen Ausschnitt der Landeshauptstadt Graz, welche durch dichte Siedlungsstrukturen, gute ÖV-Anbindungen und reichlichen Angeboten in der Daseinsvorsorge charakterisiert ist. Die zweite Darstellung zeigt einen Ausschnitt der mittelgroßen Stadt Leoben, welche sowohl urbane als auch ländliche Merkmale aufweist. Die dritte Darstellung zeigt einen Ausschnitt der ländlichen Gemeinde Wartberg im Mürztal, welche eine geringe Bevölkerungsdichte sowie mangelhafte ÖV-Anbindungen und Verfügbarkeiten in der Daseinsvorsorge aufweist. Im Anschluss an die Präsentation der kartographischen Ergebnisse werden noch Pop-ups zu diversen Features vorgestellt, da sie einen tieferen Einblick in die Eigenschaften der Kartenobjekte gestatten.

10.1. Die Landeshauptstadt Graz

Abbildung 61 zeigt den Nordosten der steirischen Landeshauptstadt Graz, deren urbane Bauweisen und gute Infrastrukturen die Abhängigkeit vom PKW vielerorts stark reduzieren.

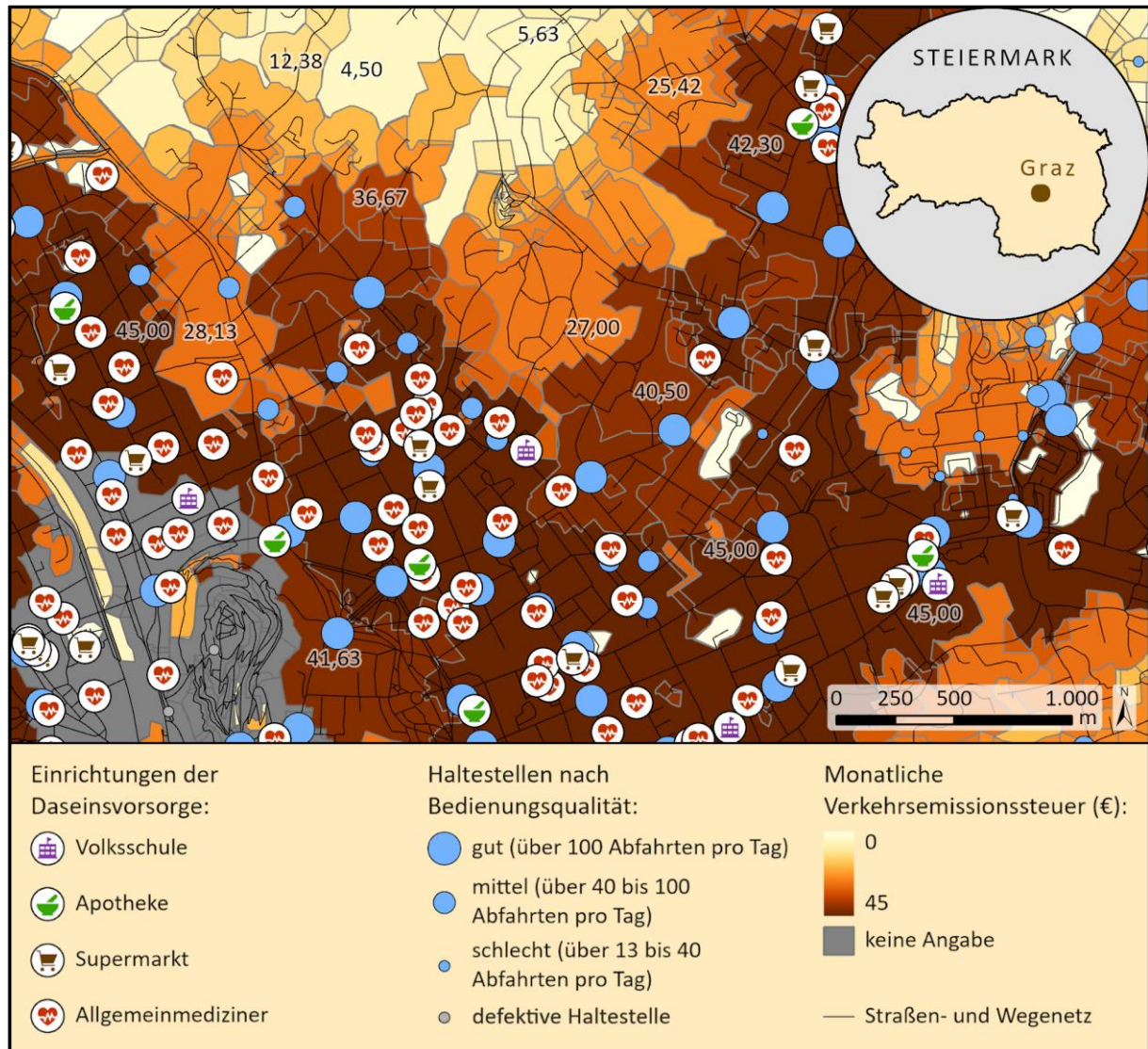


Abb. 61: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge im Nordosten von Graz (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Am ersten Blick auf die Karte fällt auf, dass die monatliche Verkehrsemissionssteuer in jenen Gebieten am höchsten ausfällt, in denen sich besonders viele Haltestellen (mit hoher Bedienungsqualität) und Einrichtungen der Daseinsvorsorge konzentrieren. Es überrascht nicht, dass die südwestlichen Flächen in Zentrumsnähe am dunkelsten sind und in Richtung Stadtumland im Nordosten tendenziell immer heller werden. Sobald sich die Anzahl und/oder Bedienungshäufigkeit der Haltestellen sowie die Anzahl der Volksschulen, Apotheken, Supermärkte und Allgemeinmediziner verringert, schrumpft auch der Steuersatz, da sich in den betreffenden Stadtteilen die fußläufigen Distanzen zu wichtigen Einrichtungen vergrößern und damit einhergehend auch die Autoabhängigkeit steigt. Einzelne Arme dunkler Flächen erstrecken sich bis ins niedrig besteuerte Umland hinaus, weil sie entlang wichtiger ÖV-Achsen verlaufen, die nicht nur durch hochrangige Haltestellen, sondern auch lokale Ballungen in der

Daseinsvorsorge charakterisiert sind. Im äußersten Südwesten des Ausschnitts sind keine steuerlichen Angaben verfügbar, da sich diese Gebiete im Einzugsgebiet defektiver Haltestellen befinden.

10.2. Das regionale Zentrum Leoben

Abbildung 62 zeigt den Nordosten der mittelgroßen Stadt Leoben, welche durch variierende Autoabhängigkeiten und Steuerverhältnisse auffällt.

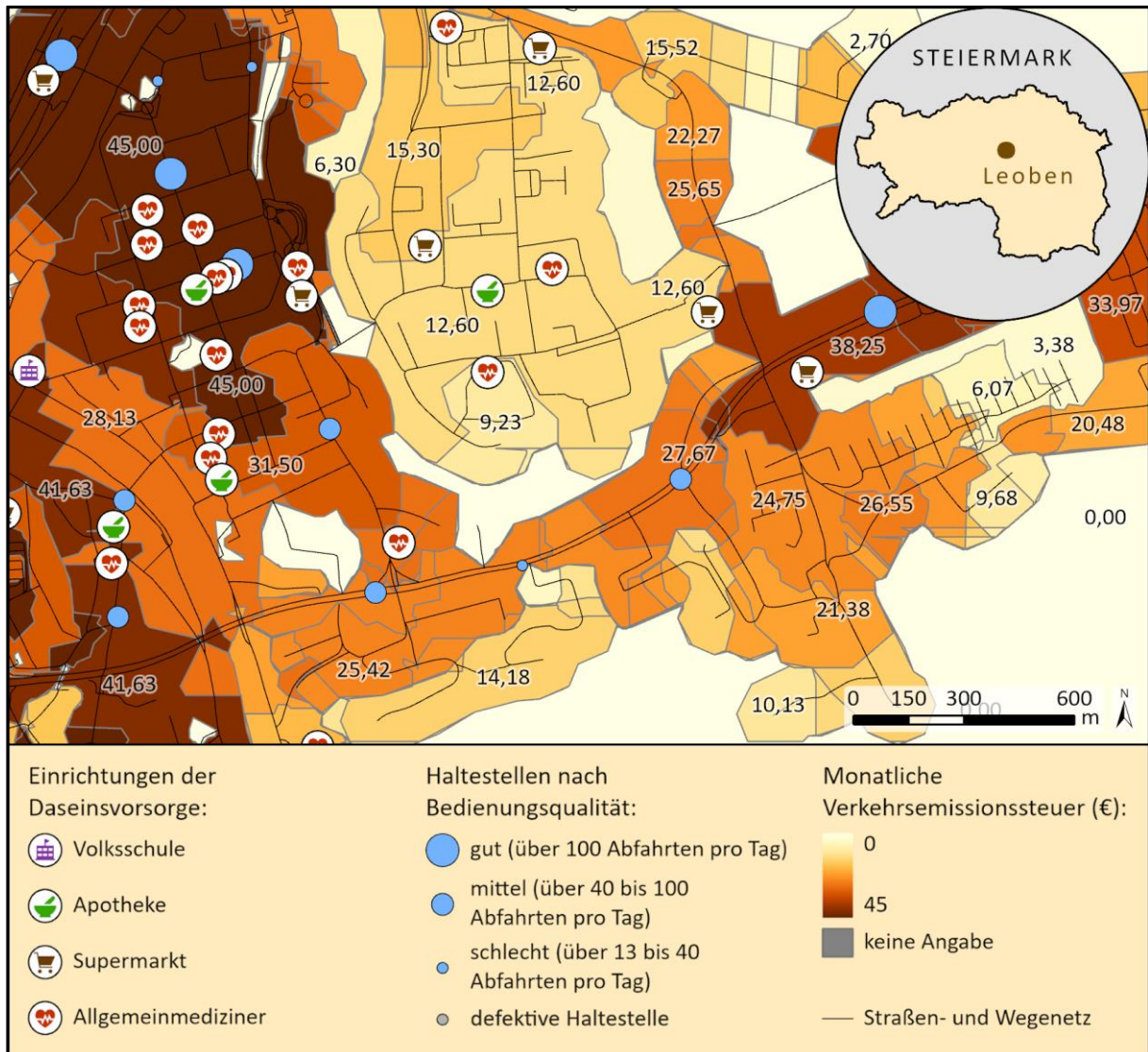


Abb. 62: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge im Nordosten von Leoben (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Die dunkelsten Flächen, die auf Steuersätze von bis zu 45,00 Euro verweisen, bieten eine hohe Verfügbarkeit von hochrangigen Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge unter Berücksichtigung optimaler fußläufiger Erreichbarkeitsverhältnisse. Wie man auch schön erkennen kann, weisen die helleren bzw. geringer besteuerten Flächen einen Mangel an (hochrangigen) Haltestellen und/oder Einrichtungen der Daseinsvorsorge auf. Jene Flächen, die mit einem Betrag von 0,00 Euro gekennzeichnet sind, befinden sich entweder sehr abgelegenen

oder sind aufgrund fehlender Straßen und Wege schwer zugänglich. Da die Haltestellen mit Anteilen bis zu 60 Prozent an der räumlichen Gesamtgewichtung in die Steuerberechnungen eingeflossen sind (bei den Einrichtungen der Daseinsvorsorge waren es nur bis zu 40 Prozent), beeinflussen deren Verteilung und Bedienungshäufigkeit die Höhe des Steuersatzes stärker als die Volksschulen, Apotheken, Supermärkte und Allgemeinmediziner. Dieses Verhältnis ist ebenfalls deutlich auf der Karte sichtbar: Beispielsweise weisen die helleren Gebiete im zentralen und nördlichen Bereich des Ausschnitts vorwiegend Einrichtungen der Daseinsvorsorge auf, während entlang der ÖV-Achse, die von Südwesten nach Nordosten verläuft, tendenziell dunklere Flächen vorherrschen.

10.3. Die ländliche Gemeinde Wartberg im Mürztal

Abbildung 63 zeigt die Gemeinde Wartberg im Mürztal, deren ländliche Bauweisen und mangelhaften Infrastrukturen die Abhängigkeit von einem PKW vielerorts stark erhöhen.

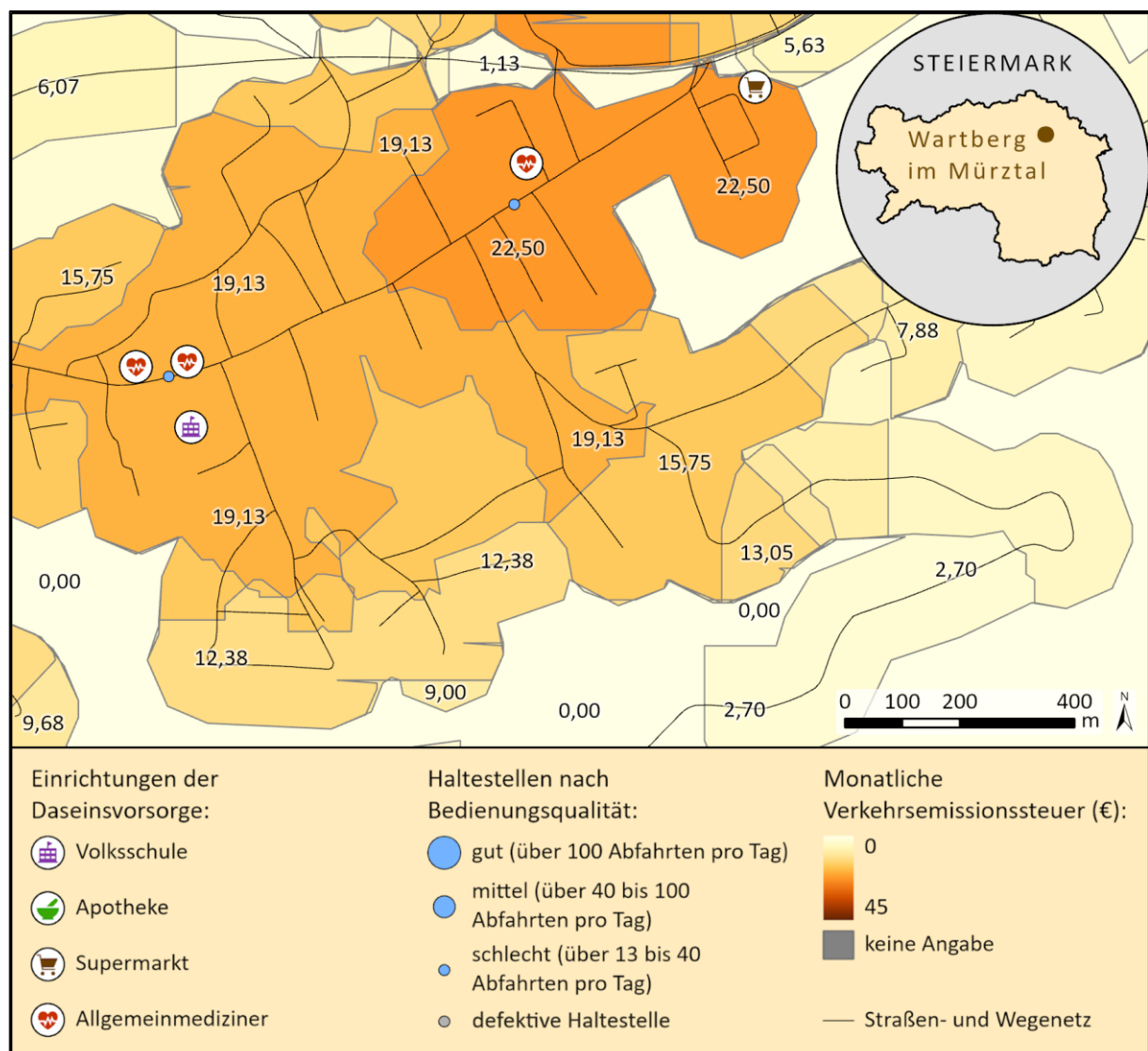


Abb. 63: Monatliche Verkehrsemissionssteuer, Lage der ÖV-Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge in Wartberg im Mürztal (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Wie man auf der Karte sieht, verfügt diese ländliche Siedlung nur über sehr wenige Haltestellen, die noch dazu eine schlechte Bedienungsqualität aufweisen. Auch das Angebot der Daseinsvorsorge ist äußerst bescheiden, weshalb weite Teile des Ausschnitts durch helle bzw. gering besteuerte Flächen ausgewiesen sind. Dennoch lohnt sich eine genauere Untersuchung der kartographischen Verhältnisse, weil sie die räumlichen Eigenschaften und mathematischen Gewichtungen der Einrichtungen erstaunlich präzise wiedergeben: Sowohl im westlichen als auch im nördlichen Polygon lässt sich eine einzige Haltestelle (mit geringer Bedienungshäufigkeit) ausmachen. Daraus lässt sich schließen, dass die unterschiedlich hohe Besteuerung jener beiden Polygone nur auf verschiedene Ausstattungen und Erreichbarkeitsverhältnisse in der Daseinsvorsorge zurückzuführen sein kann. Eine voreilige Analyse könnte aber die Vermutung nahelegen, dass es sich hier um einen Daten- oder Berechnungsfehler handelt – denn schließlich weist das hellere der beiden Polygone (mit einer höheren Autoabhängigkeit) drei räumlich geballte Einrichtungen der Daseinsvorsorge auf, während das dunklere Polygon (mit einer etwas geringeren Autoabhängigkeit) lediglich über zwei Einrichtungen der Daseinsvorsorge und in größerer Distanz zueinander verfügt. Dieser räumliche Sachverhalt wirkt am ersten Blick widersprüchlich, lässt sich jedoch logisch erklären: Erstens fällt bei der Daseinsvorsorge das mehrfache Vorhandensein eines bestimmten Einrichtungstyps (wie im Falle der beiden Allgemeinmediziner im helleren Polygon) nicht ins Gewicht, weil nur eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Einrichtungstypen von Bedeutung ist. Zweitens umfasst die innere Isochrone (also das kürzere fußläufige Distanzintervall im Einzugsgebiet) der Volksschule auch das dunklere Polygon, da sie sich 1.000 Meter weit von der Volksschule erstreckt. Daraus ergibt sich ein relativ großer Beitrag zur Gesamtgewichtung des dunkleren Polygons. Umgekehrt jedoch übt der Supermarkt nur einen geringeren Einfluss auf die Gesamtgewichtung des helleren Polygons aus, weil dessen innere Isochrone lediglich Distanzen bis zu 500 Metern abdeckt. Drittens sind die Gewichtungswerte der Supermärkte generell höher als jene der Volksschulen, wovon wiederum das dunklere Polygon, in dem sich immerhin der Supermarkt befindet, stärker profitiert. All diese Gründe bestätigen, dass die Gesamtgewichtung und somit auch die Verkehrsemissionssteuer im dunkleren Polygon tatsächlich höher ausfallen als im helleren Nachbarpolygon.

10.4. Informationsabfrage mittels Pop-ups

Durch Anklicken eines Features auf der Karte öffnet sich ein Pop-up-Fenster, welches nähere Informationen zum ausgewählten Objekt anzeigt. Diese Funktion erweist sich insbesondere bei der Abfrage der Steuerpolygone als nützlich, da mithilfe deren Pop-ups die einzelnen Komponenten, aus denen sich die monatliche Verkehrsemissionssteuer zusammensetzt, nachvollzogen werden können.

Das Pop-up in Abbildung 64 entstammt einem beispielhaften Polygon in der Landeshauptstadt Graz, das sehr gute Erreichbarkeitsverhältnisse aufweist: Von allen Orten innerhalb dieses Polygons kann eine Haltestelle mit guter Bedienungsqualität (über 100 Abfahrten pro Tag) in maximal 400 Metern erreicht werden, was einer Höchstgewichtung von 0,6 entspricht. Außerdem kann der nächste Supermarkt in 500 bis 1.000 Metern (Gewichtung 0,075), der nächste Allgemeinmediziner in maximal 800 Metern (Gewichtung 0,08), die nächste

Volksschule in 1.000 bis 2.000 Metern (Gewichtung 0,06) und die nächste Apotheke in maximal 800 Metern (Gewichtung 0,05) erreicht werden. Daraus ergibt sich eine Gewichtungssumme von 0,865. Ihre Multiplikation mit dem Faktor 1 (durch das Vorhandensein eines gemeldeten PKW an der Hauptwohnsitzadresse) sowie mit einem weiteren Faktor 1 (durch das Fehlen gemeldeter Personen mit eingeschränkter Mobilität an der Hauptwohnsitzadresse) belässt das Zwischenergebnis unverändert. Schließlich ergibt sich durch die Multiplikation jenes Zwischenergebnisses (0,865) mit dem Basissteuersatz von 45,00 Euro eine monatliche Verkehrsemissionssteuer von 38,92 Euro.

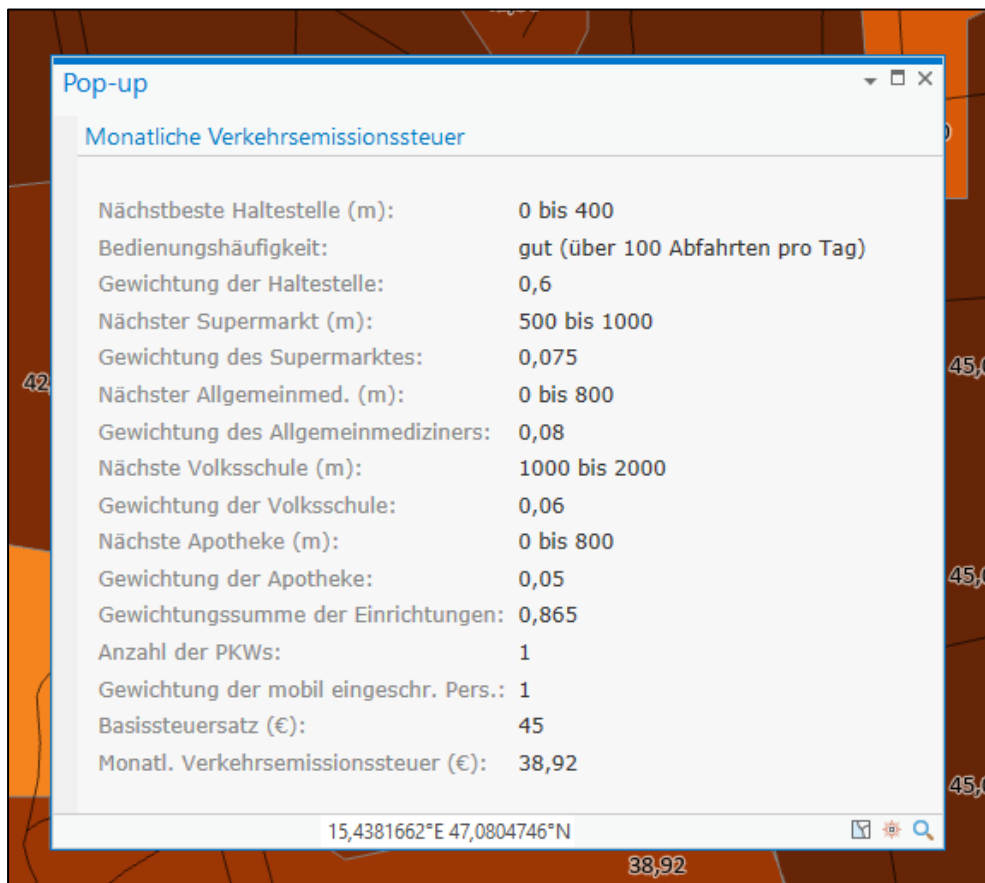


Abb. 64: Pop-up-Fenster der monatlichen Verkehrsemissionssteuer in einem Stadtteil von Graz (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Als Gegenüberstellung zum letzten Beispiel wird nachfolgend die räumliche und steuerliche Situation einer Region in der Gemeinde Mautern in der Steiermark erläutert. Das Pop-up in Abbildung 65 entstammt einem beispielhaften Polygon in der ländlichen Gemeinde Mautern in der Steiermark, die eher schlechte Erreichbarkeitsverhältnisse aufweist: Von allen Orten innerhalb dieses Polygons kann nur eine Haltestelle mit schlechter Bedienungsqualität (über 13 bis 40 Abfahrten pro Tag) in 400 bis 800 Metern erreicht werden, was einer Gewichtung von lediglich 0,075 entspricht. Außerdem befindet sich der nächste Supermarkt mit einer Entfernung von über 1.000 Metern außerhalb des fußläufigen Einzugsbereichs (Gewichtung 0), der nächste Allgemeinmediziner mit einer Entfernung von über 1.200 Metern ebenfalls außerhalb des fußläufigen Einzugsbereichs (Gewichtung 0), die nächste Volksschule 0 bis 1.000 Meter entfernt (Gewichtung 0,12) und die nächste Apotheke mit einer Entfernung von über 1.200 Metern erneut außerhalb des fußläufigen Einzugsbereichs (Gewichtung 0). Daraus ergibt sich eine Gewichtungssumme von 0,195. Ihre Multiplikation mit dem Faktor 1 (durch

das Vorhandensein eines gemeldeten PKW an der Hauptwohnsitzadresse) sowie mit einem weiteren Faktor 1 (durch das Fehlen gemeldeter Personen mit eingeschränkter Mobilität an der Hauptwohnsitzadresse) belässt das Zwischenergebnis unverändert. Schließlich ergibt sich durch die Multiplikation jenes Zwischenergebnisses (0,195) mit dem Basissteuersatz von 45,00 Euro eine monatliche Verkehrsemissionssteuer von gerundet 8,78 Euro.

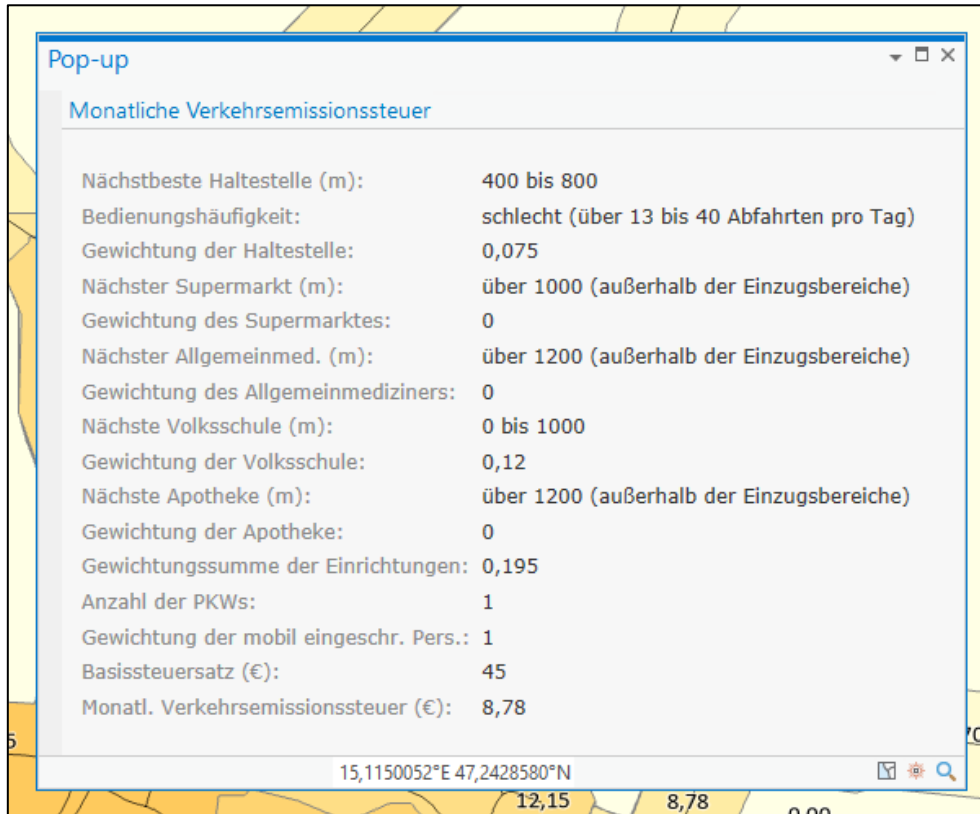


Abb. 65: Pop-up-Fenster der monatlichen Verkehrsemissionssteuer in Mautern in der Steiermark (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Über dem Polygonlayer befindet sich das Straßen- und Wegenetz, dessen Objektinformationen ebenfalls via Pop-ups einsehbar sind. Das Pop-up in Abbildung 66 zeigt den Namen, die Kategorie und die Länge einer beispielhaften Straße.

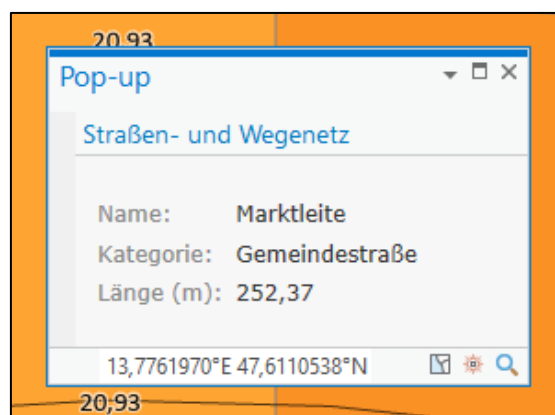


Abb. 66: Pop-up-Fenster einer Straße (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Der oberste Datenlayer umfasst die Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge, die sich auch auswählen und im Detail anzeigen lassen. Im Falle der Haltestellen können folgende Informationen eingesehen werden (siehe Abb. 67): Der Name, die geltenden Tarifzonen sowie die Linien, welche die jeweilige Haltestelle bedienen. Außerdem wird Auskunft darüber gegeben, wie viele Abfahrten an bestimmten Tagen angeboten werden. Zusätzlich ist der Mittelwert aller täglichen Abfahrten und die damit in Zusammenhang stehende Bedienungshäufigkeit angeführt.



Abb. 67: Pop-up-Fenster einer Haltestelle (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Die Pop-ups zu den Einrichtungen der Daseinsvorsorge informieren über Supermärkte, Allgemeinmediziner, Volksschulen und Apotheken. Nachfolgend ist beispielhaft das Pop-up-Fenster einer Apotheke zu sehen (siehe Abb. 68), deren Name „Zum schwarzen Bären“ lautet. Außerdem erhält man Adressangaben (Straße, Postleitzahl und Ort) sowie die Distanz zum Netzwerk. Letztere bezieht sich auf die kürzeste geradlinige Verbindung von der Einrichtung zum nächstgelegenen Segment des Netzwerks und ist in Metern angegeben.



Abb. 68: Pop-up-Fenster einer Apotheke (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

11. Probleme und weiterer Handlungsbedarf

Im Rahmen der Masterarbeit wurde versucht, diverse räumliche Faktoren von größerer Bedeutung möglichst flächendeckend in die Netzwerkanalysen einzubeziehen, um die monatliche Verkehrsemissionssteuer optimal an die individuellen Wohnverhältnisse und somit an die Autoabhängigkeit des zu untersuchenden Haushalts anzupassen. Zu diesem Zweck wurden sowohl die ÖV-Haltestellen samt Bedienungsqualität als auch jene Einrichtungen der Daseinsvorsorge, welche laut facheinschlägiger Publikationen am häufigsten aufgesucht werden, herangezogen. Zusätzlich wurde anhand von Gewichtungsfaktoren auch die unterschiedliche Relevanz der räumlichen Objekte in den Berechnungen berücksichtigt. Die dadurch ermittelten Ergebniskarten mit den Steuerpolygonen, ihre Ausprägungen und räumlichen Verhältnisse im Kontext des Straßen- und Wegenetzes sowie der Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge bestätigen die korrekte Datenprozessierung mit den Geoverarbeitungswerkzeugen. Auch die Pop-ups der räumlichen Objekte und Informationen zu den Steuerberechnungen lassen grundsätzlich auf eine saubere Methodik schließen.

Dennoch weisen die Ergebnisse gewisse Mängel auf, die durch Verfeinerung der bestehenden Parameter oder ihre Ergänzung mit weiteren aussagekräftigen Raumfaktoren reduziert werden können. Manchmal können auch Unvollständigkeiten oder Ungenauigkeiten im Quelldatensatz für unbefriedigende Resultate verantwortlich sein. Z. B. lässt sich auf den Kartenausschnitten mancher Gebiete ein Treppeneffekt im Polygonlayer ausmachen (siehe Abb. 69).

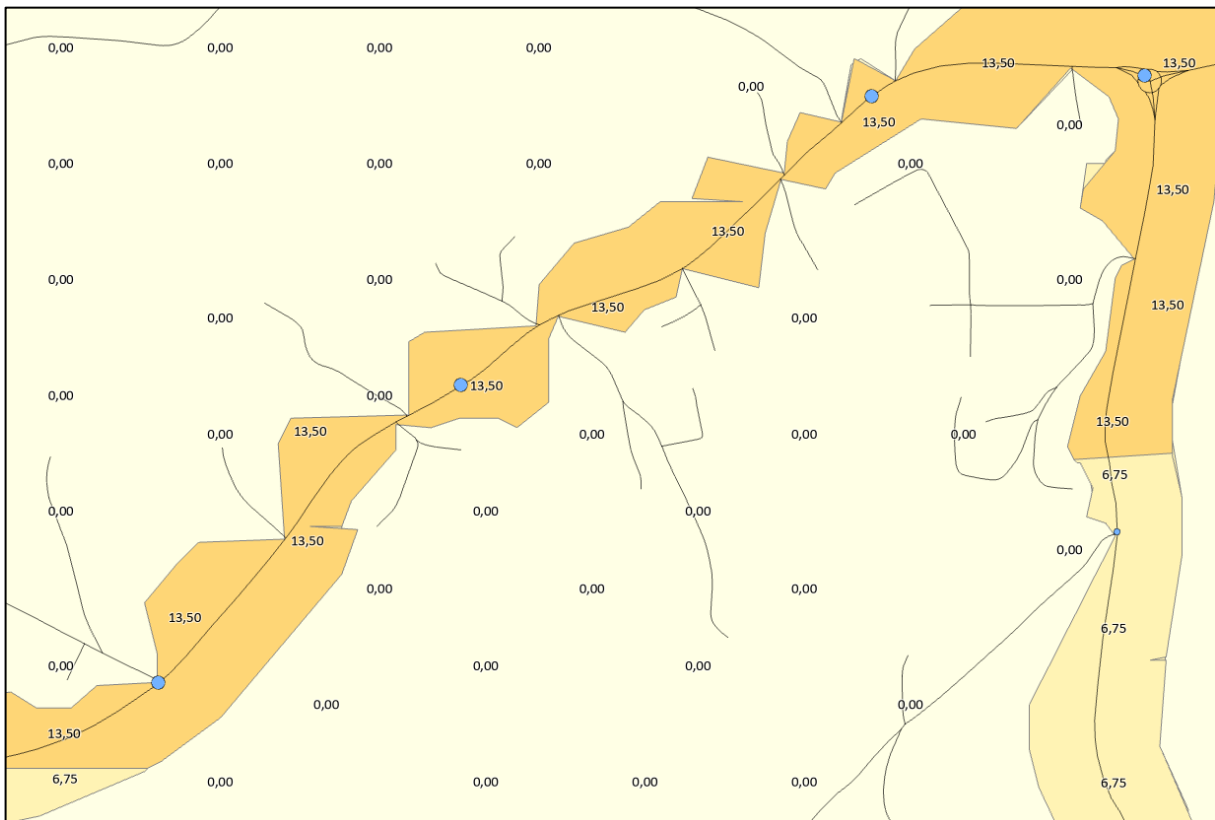


Abb. 69: Treppeneffekt im Polygonlayer (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Wie ersichtlich, taucht diese treppenartige Erscheinung oft entlang von Straßenkreuzungen auf, was zu ausgefranzten Grenzziehungen zwischen unterschiedlichen Steuerklassen führt. Die

Folge ist, dass Nebenstraßen, die sich etwa in unmittelbarer Nähe zu einer Haltestelle befinden, trotzdem mit einer Steuerbefreiung (0,00 Euro) hinterlegt sind. Die genaue Ursache für dieses Phänomen konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Ein anderes Beispiel veranschaulicht, dass mancherorts abrupte Übergänge zwischen benachbarten Steuergebieten auftreten können (siehe Abb. 70).

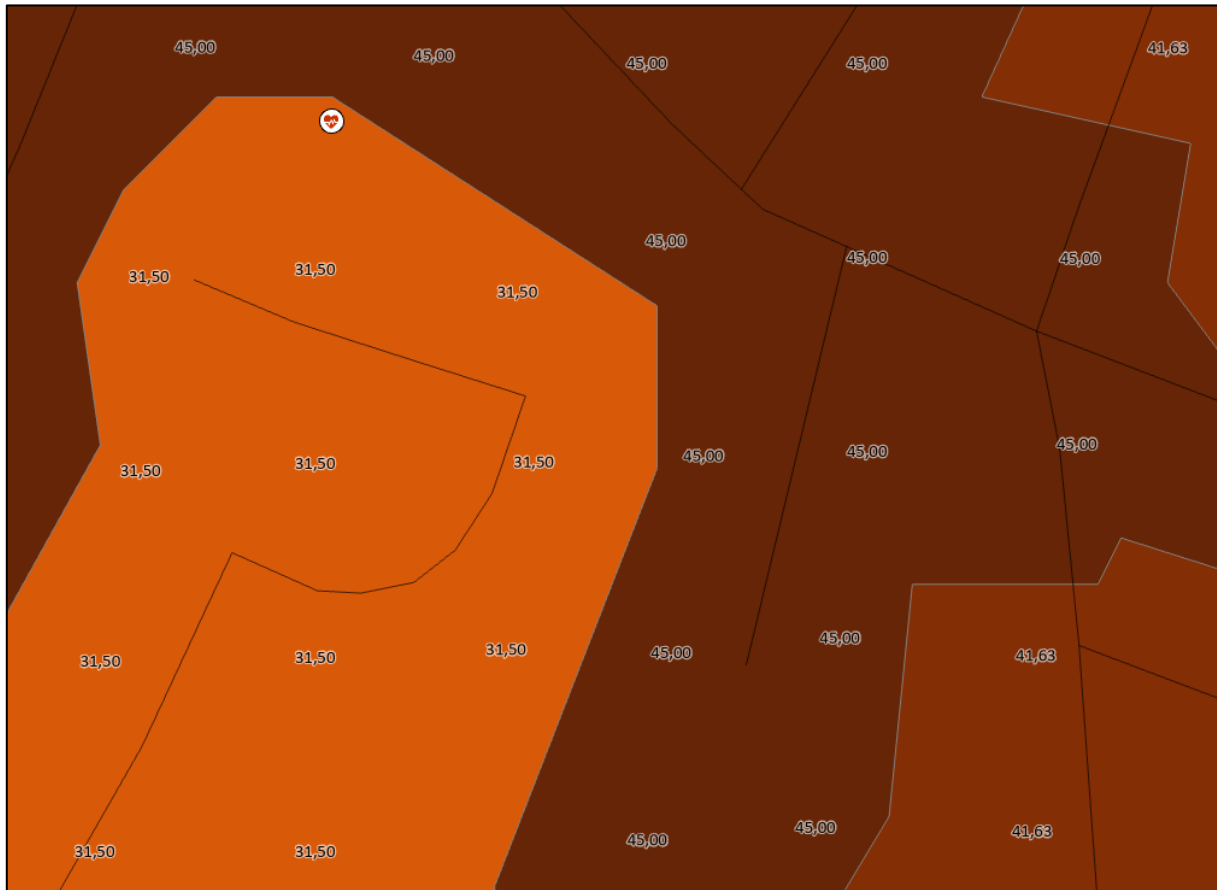


Abb. 70: Abrupte Übergänge im Polygonlayer (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Solche harten Grenzziehungen sind ursächlich nicht den Netzwerkanalysen, sondern den herangezogenen Datensätzen verschuldet. Denn der Unterschied von 13,50 Euro zwischen dem hellsten und dunkelsten Polygon in Abbildung 70 besteht deshalb, weil keine Straßen- oder Wegverbindung zwischen ihnen existiert, sodass die BewohnerInnen des einen Gebiets räumlich nicht unmittelbar von den Haltestellen bzw. Einrichtungen des anderen Gebiets profitieren können. Dies allein wäre kein Fehler oder Mangel, allerdings ist nicht sicher, ob der eingetragene Allgemeinmediziner tatsächlich nur über die Straße im hellen Polygon erreichbar ist oder ob er irrtümlich diesem Polygon zugewiesen wurde, weil die Distanz zwischen ihm und dem Netzwerk dort am geringsten ausfällt. Möglicherweise ist der Allgemeinmediziner sogar nur vom Straßennetz im dunklen Polygon erreichbar, was aber aus dem entsprechenden Datensatz nicht in dieser Detailgenauigkeit herauslesbar ist. Natürlich könnte der beschriebene Sachverhalt auch umgekehrt bestehen (nämlich dass der Allgemeinmediziner irrtümlich dem dunklen Polygon angerechnet wurde), was wiederum eine Verfälschung des Ergebnisses durch ungenaue Faktorenberechnung nach sich ziehen würde. Um solche Ungewissheiten zu vermeiden, müssten präzisere Datensätze mit weiteren Attributen für die Berechnungen herangezogen werden.

Das letzte vorgestellte Beispiel stellt zwar keinen Fehler per se dar, verweist aber auf eine Problematik in der Geometrie (siehe Abb. 71).

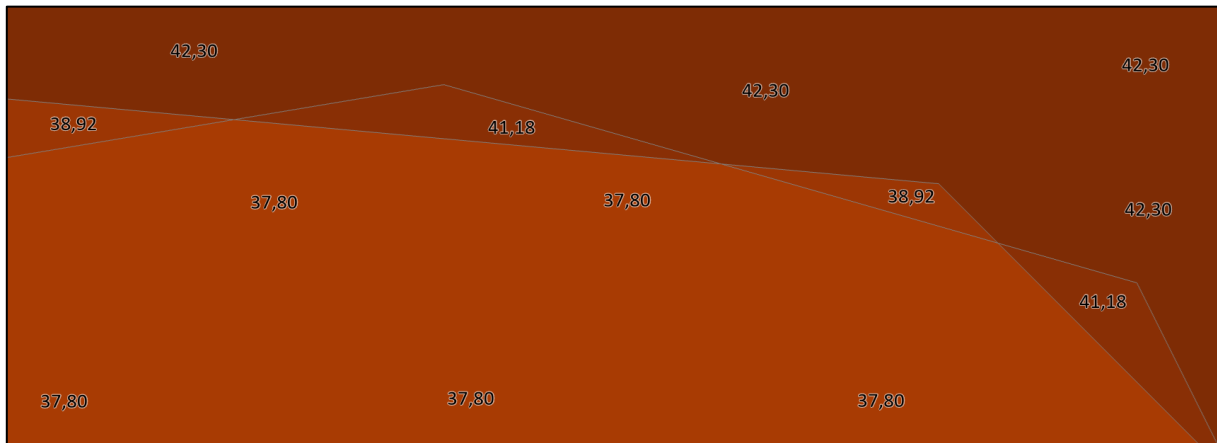


Abb. 71: Geometrische Zerteilung im Polygonlayer (Quelle: ArcGIS Pro; eigene Darstellung, 2020)

Die dargestellte geometrische Zerteilung in sehr kleinen Raumverhältnissen liegt daran, dass sich mehrere Polygone nicht deckungsgleich überlagern und dadurch spitzwinkelige Randflächen hinterlassen. Für Steuerbemessungen von Haushalten ist dies problematisch, da die zerteilten Flächen meistens deutlich kleiner sind als die Grundstückparzellen. Durch die geometrische Glättung oder Generalisierung solcher Ränder mithilfe spezieller Tools könnte das Problem behoben werden.

Schließlich ist auch auf einen weiteren Grund hinzuweisen, weswegen Ungenauigkeiten in den Ergebnissen vorkommen können: Die Integration soziodemographischer, mobilitätsbezogener und steuerlicher Faktoren wurde nicht umfassend behandelt, weil sie nicht Gegenstand dieser Untersuchung war. Im Rahmen der Masterarbeit wurde lediglich ein erster Entwurf für die Berechnung der netzwerkbasierter Verkehrsemissionssteuer erarbeitet, wobei der Schwerpunkt ganz klar auf die GIS-Komponente gelegt wurde. Aufbauend auf den hier erzielten Ergebnissen werden vermutlich empirische Erhebungen und sonstige Untersuchungen anderer Fachdisziplinen notwendig sein, um die soziodemographischen Einflüsse, Erreichbarkeiten und Angebote der Haltestellen und Daseinsvorsorge, Höhe der Steuersätze etc. auf angemessene Weise festlegen zu können.

Damit einhergehend ergibt sich auch weiterer Handlungsbedarf in folgenden Bereichen: Bei den durchgeführten Netzwerkanalysen war nur die Anzahl der gemeldeten PKW mit Diesel- oder Benzinantrieb von Relevanz. Fahrzeuge mit Elektro-, Hybrid- oder anderen Antriebsarten konnten bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt werden, ebenso keine LKW oder einspurigen Kraftfahrzeuge. Der Faktor der Motorleistung findet bereits in der motorbezogenen Versicherungssteuer Berücksichtigung und der Faktor der jährlich zurückgelegten Fahrleistung kommt in der Mineralölsteuer zu Geltung. Dennoch besteht die Möglichkeit, letztere beiden Faktoren bei Bedarf ebenso in die Berechnung der netzwerkbasierter Verkehrsemissionssteuer zu integrieren.

Weitere Ausbaufähigkeit stellt die Abgrenzung zwischen Privat- und Berufsverkehr dar. Die vorliegende Masterarbeit widmet sich ausschließlich dem Privatverkehr, unter der Annahme, dass nur jene Firmenautos von der monatlichen Verkehrsemissionssteuer betroffen sind, welche zur Privatnutzung gemeldet sind. Auch die konkrete Definition und Klassifizierung von

Personen mit eingeschränkter Mobilität wäre hilfreich, um die Steuer noch besser an reale Lebensumstände anzupassen.

Nicht zuletzt ist auch anzumerken, dass sich die räumliche Zuordnung der Grundstücke zur feingegliederten Polygonlandschaft als problematisch erweisen kann. Schließlich kommt es des Öfteren vor, dass sich unterschiedlich besteuerte Gebietseinheiten in ein und demselben Grundstück befinden oder dass die Grundstücksgrenze über mehrere Steuerpolygone verläuft. Die geometrische Angleichung der Polygonlandschaft an die Grundstücksgrenzen wäre eine mögliche Lösung, welche jedoch mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden sein dürfte.

12. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt der vorliegenden Masterarbeit war die Problematik, dass die Ökologisierung des Personenverkehrs politische Vorkehrungen wie etwa steuerliche Eingriffe erfordert, ohne aber autoabhängige Bevölkerungsgruppen zu benachteiligen. Daraus wurde die **zentrale Forschungsfrage** abgeleitet, **wie mithilfe eines GIS ein Tool entwickelt werden kann, das eine vom Hauptwohnsitz abhängige Verkehrsemissionssteuer berechnet**. Dies konnte durch die **Integration hauptsächlich räumlicher, aber auch sozialer Einflussfaktoren in mehreren Netzwerkanalysen** erreicht werden. Als Ergänzung bzw. Vertiefung zur zentralen Forschungsfrage wurden detailliertere **Arbeitsfragen** beantwortet, welche sich auf die **geeignete Wahl der Parameter, deren Transformation in messbare Größen sowie die Automatisierung der gesamten Prozessabfolge** bezogen.

Die gesamte Untersuchung lässt sich grob vereinfacht anhand folgenden Ablaufs beschreiben: Zunächst mussten alle Datensätze entsprechend ihrer Beschaffenheit und Verwendung aufbereitet werden. Dabei wurden die Haltestellen des ÖV hinsichtlich der Bedienungshäufigkeit klassifiziert, um ihre unterschiedliche Angebotsqualität in den Netzwerkanalysen berücksichtigen zu können. Aus dieser Kategorisierung gingen die sogenannten Haltestellenklassen hervor. Im Gegensatz dazu mussten die Einrichtungen der Daseinsvorsorge einem Selektionsprozess unterzogen werden, um ausschließlich jene Daten bereitzustellen, welche für die Analysen relevant waren. Darüber hinaus war es auch erforderlich, den Verkehrsgraphen für fußgängertaugliche Erreichbarkeitsberechnungen aufzubereiten und mittels der steirischen Landesgrenze alle Datensätze auf die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebiets zuzuschneiden.

Danach konnten die Netzwerkanalysen mit den erwähnten Objekten vorgenommen werden. Hierbei galt es zu beachten, dass die Haltestellen des ÖV und Einrichtungen der Daseinsvorsorge nach unterschiedlichem Prinzip zu analysieren waren: Da für einen konkreten Wohnstandort in der Regel die fußläufige Distanz zu Haltestellen mit hoher Bedienungshäufigkeit relevanter ist als zu jenen mit geringer Bedienungshäufigkeit, mussten sich die Einzugsgebiete der unterschiedlichen Haltestellenklassen hierarchisch überlagern. In ArcGIS Pro wurde dies mittels Datenebenen realisiert, wobei die Daten einer Ebene jene aller darunter befindlichen Ebenen räumlich substituierten. Im Gegensatz dazu handelte es sich bei den Einrichtungen der Daseinsvorsorge um sich ergänzende Einrichtungstypen (Supermärkte, Ärzte, Apotheken und Volksschulen), von denen eine möglichst große Anzahl in möglichst geringer Distanz vorhanden sein sollte. Dieser funktionale Unterschied zwischen den Objektgruppen erforderte dementsprechend angepasste Vorgehensweisen, welche auch in der anschließenden Gewichtung der Datensätze zur Geltung kommen mussten.

Nachdem auch die Netzwerkanalysen und Gewichtungen abgeschlossen waren, wurden die Zwischenergebnisse mit einem haushaltsbezogenen Faktor (abgeleitet aus der Anzahl der gemeldeten Personen mit eingeschränkter Mobilität), der Anzahl der gemeldeten PKW sowie einem definierten Basissteuersatz multipliziert, um schlussendlich die netzwerkbasierte Verkehrsemissionssteuer zu generieren. Der gesamte Ablauf wurde samt seinen Haupt- und Subprozessen mit dem ModelBuilder von ArcGIS Pro umgesetzt, sodass die personenbezogenen Variablen (sowie gegebenenfalls auch andere Parameter) nachträglich jederzeit angepasst werden konnten.

Die kartographisch aufbereiteten Ergebnisse umfassten im Sinne einer anschaulichen und heterogenen Präsentation drei unterschiedliche Raumtypen: Die dichtbevölkerte Landeshauptstadt Graz, die mittelgroße Stadt Leoben und die ländliche Gemeinde Wartberg im Mürztal. Dargestellt auf jeweils drei Ebenen (Steuerpolygone, Straßen- und Wegenetz sowie Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge) spiegeln die berechneten Daten genau den räumlichen Zusammenhang zwischen den örtlichen Erreichbarkeitsverhältnissen samt ihren Gewichtungen und der Höhe der monatlichen Verkehrsemissionssteuer wider. In jenen Gebieten, die von gut erschlossenem ÖV und einem diversen Angebot in der Daseinsvorsorge geprägt sind, kommen höhere Besteuerungen zu tragen. Im Gegensatz dazu weisen periphere Regionen mit einem Mangel an akkuraten Haltestellen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge deutlich niedrigere Steuersätze auf oder sind überhaupt von jeglichen Abgaben befreit.

Diese beschriebene Vorgangsweise liefert eine angemessene Antwort auf die **zentrale Forschungsfrage** sowie auf jene **Arbeitsfragen**, die sich mit der **Wahl geeigneter Parameter** und der **Prozessautomatisierung** auseinandersetzen. Die **Arbeitsfrage** bezüglich der **Transformation in messbare Größen** wurde dahingehend beantwortet, dass sich **sowohl die Erreichbarkeit als auch die Priorität der Haltestellen und Einrichtungstypen quantifizieren** ließen. Während die **Erreichbarkeit durch die Bildung zweistufiger Einzugsgebiete mit fußläufigen Distanzwerten** ausgedrückt wurde, fand eine **Koppelung der Objektpriorität (und der Entfernungen) mit entsprechenden Gewichtungswerten** statt. Letztere konnten anschließend **mit den fahrzeug- und haushaltsbezogenen Faktoren zur monatlichen Verkehrsemissionssteuer multipliziert** werden.

Trotz der aussagekräftigen Ergebnisse lassen sich ein paar geometrisch-technische Probleme in Bezug auf die dargestellten Steuerpolygone feststellen. Einerseits ist mancherorts ein sogenannter Treppeneffekt vorzufinden, der teilweise zu falschen Abgrenzungen der Steuerbemessung führt. Andererseits können ungenaue oder unvollständige Geodaten zu verzerrten Resultaten führen. Beispielsweise ist es möglich, dass Einrichtungen falschen Straßenabschnitten zugeordnet werden, obwohl sie eigentlich über andere Teile im Netzwerk zugänglich sind. Darüber hinaus kommt es durch die Überlagerung unterschiedlicher Einzugsgebietspolygone in einigen Fällen zu sehr spitzwinkligen Randflächen, welche keine räumlich adäquate Steuerbemessung zulassen.

Neben der Weiterentwicklung technischer Komponenten stellen sich für einen praxistauglichen Einsatz der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer auch inhaltliche Fragen. So wäre es denkbar, weitere Abgaben wie etwa die Mineralölsteuer oder motorbezogene Versicherungssteuer in die hier durchgeführte Steuerbemessung zu integrieren, um nicht nur den Besitz eines PKW, sondern auch Faktoren wie den Treibstoffverbrauch und die Fahrleistung für die Umsetzung einer universalen Verkehrsemissionssteuer heranzuziehen. Weiters müsste die Abgrenzung zwischen Berufs- und Privatverkehr sowie die Präzisierung bestehender und Integration neuer Sozialfaktoren geklärt werden. Darüber hinaus wäre es für einen Praxiseinsatz der netzwerkbasierten Verkehrsemissionssteuer erforderlich, die Grundstücksgrenzen in der geometrischen Strukturierung der besteuerten Gebietseinheiten zu berücksichtigen.

In diesem Sinne ist die vorliegende Masterarbeit als GIS-bezogener Ansatz zu verstehen, der zu einem weiteren Ausbau unter Beteiligung unterschiedlicher Fachkompetenzen anregen soll.

13. Literatur

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hrsg.) (2017a): Mikro-ÖV Strategie Steiermark. – Graz.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hrsg.) (2017b): Steiermark. Wohnbevölkerung am 1.1.2017. Wanderungen 2016. – Graz. (= Steirische Statistiken, Heft 8/2017).

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hrsg.) (2019): Steiermark Straßenverkehr 2018. Kfz-Bestand, Neuzulassungen und Unfallgeschehen. – Graz. (= Steirische Statistiken 4/2019).

BBR (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung) (Hrsg.) (2001): Kriterien für die räumliche Differenzierung des EU-Territoriums: Geographische Lage. Studienprogramm zur europäischen Raumplanung. – Bonn. (= Forschungen, Heft 102.1).

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) (Hrsg.) (2019): Methodische Weiterentwicklungen der Erreichbarkeitsanalysen des BBSR. – Bonn. (= BBSR-Online-Publikation Nr. 09/2019).

BERNHARD F. (2016): Verkehrsinfrastrukturen und Mobilitätsverhalten. Analyse des Mobilitätsverhaltens und der Verkehrsinfrastrukturen in ländlichen Räumen unter dem Aspekt des regionalen, demografischen und sozialen Wandels am Beispiel der Steiermark. – In: EGGER R. und POSCH A. (Hrsg.): Lebensentwürfe im ländlichen Raum. Ein prekärer Zusammenhang? – Wiesbaden, 203-242.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (Hrsg.) (2016): Umweltrelevante Abgaben Österreichs im Vergleich. Umweltrelevante Abgaben in Österreich unter Einbeziehung von Umweltsteuern und Gebühren sowie Vergleich mit ausgewählten Ländern. Endbericht. – Wien.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (Hrsg.) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. – Berlin.

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (Hrsg.) (2020): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Ausgabe 2020. – Berlin.

BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hrsg.) (2011): Nahversorgung und Nahmobilität: Verkehrsverhalten und Zufriedenheit. – Berlin. (= BMVBS-Online-Publikation, Nr. 08/2011).

BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hrsg.) (2012): Mobilität, Erreichbarkeit und soziale Exklusion. Fähigkeiten und Ressourcen einer ländlichen Bevölkerung für eine angemessene Versorgung und Teilhabe am öffentlichen Leben. – Berlin. (= BMVBS-Online-Publikation, Nr. 27/2012).

Bundesanstalt für Bergbauernfragen (Hrsg.) (2015): Ländliche Mobilität in Österreich. Eine Bestandsaufnahme. – Wien (= Facts & Features 53).

- Bundeskanzleramt Österreich (Hrsg.) (2020): Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024. – Wien.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.) (2019a): Fortschrittsbericht 2019 nach § 6 Klimaschutzgesetz inkl. Evaluierung der gesetzten Maßnahmen. – Wien.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.) (2019b): Statusbericht zu den CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw in Österreich im Jahr 2018. – Wien.
- BÜSING C. (2010): Graphen- und Netzwerkoptimierung. – Heidelberg.
- CCCA (Climate Change Centre AUSTRIA) (Hrsg.) (2018): Sozial-ökologische Steuerreform in Österreich. – Wien.
- DE LANGE N. (2013): Geoinformatik in Theorie und Praxis. – Berlin, Heidelberg.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (Hrsg.) (2020a): Informationen zum Lernprogramm zur Erweiterung "ArcGIS Network Analyst"; <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/extensions/network-analyst/about-the-network-analyst-tutorial-exercises.htm> (05.10.2020).
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (Hrsg.) (2020b): Was ist die Erweiterung "ArcGIS Network Analyst"?; <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/help/analysis/networks/what-is-network-analyst-.htm> (05.10.2020).
- HAFTENDORN D. (2010): Mathematik sehen und verstehen. Schlüssel zur Welt. – Heidelberg.
- HALBRÜGGE M. und TAEGER S. (2018): GIS-gestützte Erreichbarkeitsanalyse der Daseinsvorsorge zur Ermittlung und Bewertung potenzieller Wohnbauflächen für eine nachhaltige Stadtentwicklung. – In: STROBL J., ZAGEL B., GRIESEBNER G. und BLASCHKE T. (Hrsg.): AGIT - Journal für Angewandte Geoinformatik, 4-2018. – Berlin und Offenbach, 316-325.
- HEINE H. und MAUTZ R. (2000): Möglichkeiten und Grenzen des Autoverzichts. Die Wahl des Verkehrsmittels angesichts der Mobilitätswänge und normativen Ansprüche der heutigen familiären Lebensweise. – Abschlussbericht eines Forschungsprojekts, Soziologisches Forschungsinstitut Göttingen, Göttingen.
- KARRAIS N. (2014): Modellierung der verbrauchsbasierten Erreichbarkeit mit GIS. – In: STROBL J., BLASCHKE T., GRIESEBNER G. und ZAGEL B. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2014. Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg. – Berlin und Offenbach, 56-67.
- KNAPP F.D. (1998): Determinanten der Verkehrsmittelwahl. – Berlin. (= Abhandlungen zur Nationalökonomie 10).
- KROISMAYR S., HIRZER P. und BITTNER M. (2016): Schulschließungen im ländlichen Raum - Beginn oder Endpunkt einer demografischen, wirtschaftlichen und sozialen Abwärtsspirale? – In: EGGER R. und POSCH A. (Hrsg.): Lebensentwürfe im ländlichen Raum. Ein prekärer Zusammenhang? – Wiesbaden, 139-168.
- LIMBOURG M. (2015): Mobilität im höheren Lebensalter in ländlichen Gebieten: Probleme und Lösungsansätze. – In: FACHINGER U. und KÜNEMUND H. (Hrsg.): Gerontologie und ländlicher Raum. Lebensbedingungen, Veränderungsprozesse und Gestaltungsmöglichkeiten. – Wiesbaden, 77-89.

- LYPP D. (2015): GIS-basierte Bewertung von Nahverkehrsnetzen durch einen Umweltverband mit frei verfügbaren Daten. – Masterarbeit, Paris-Lodron-Universität Salzburg, Salzburg.
- MACHOLD I. und TAMME O. (2009): Land am Rand? Soziale und wirtschaftliche Infrastruktur-entwicklung im ländlichen Raum in Österreich. – In: NEU C. (Hrsg.): Daseinsvorsorge. Eine gesellschaftswissenschaftliche Annäherung. – Wiesbaden, 154-169.
- MACHOLD I. (2010): Regionale Ungleichheit? Qualitative und quantitative Auswirkungen der sozialen und wirtschaftlichen Infrastrukturentwicklung auf die Bevölkerung. Dargestellt anhand von zwei ausgewählten Gemeinden in der Steiermark. – Dissertation, Universität Wien, Wien.
- MEUSBURGER M. (2018): Optimierung öffentlicher Verkehrsnetze mittels GIS. – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.
- MUNDT A. und AMANN W. (2019): Wohnungsmärkte und öffentliche Verkehrsinfrastruktur in der Steiermark. – Wien.
- NEU C. und NIKOLIC L. (2015): Versorgung im ländlichen Raum der Zukunft: Chancen und Herausforderungen. – In: FACHINGER U. und KÜNEMUND H. (Hrsg.): Gerontologie und ländlicher Raum. Lebensbedingungen, Veränderungsprozesse und Gestaltungsmöglichkeiten. – Wiesbaden, 185-206.
- NOBIS C. und KUHNIMHOF T. (2018): Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. – Bonn. (= FE-Projektnummer 70.904/15).
- ÖAW (Österreichische Akademie der Wissenschaften) (Hrsg.) (2009): Bericht zum Projekt. Potenzialmodelle für zentrale Einrichtungen in Wien. – Salzburg.
- ÖROK (Österreichische Raumordnungskonferenz) (Hrsg.) (2017): Entwicklung eines Umsetzungskonzeptes für österreichweite ÖV Güteklassen. Abschlussbericht. – Wien.
- ÖVDAT (Österreichisches Institut für Verkehrsdateninfrastruktur) (Hrsg.) (2019): Intermodaler Verkehrsgraph Österreich. Standardbeschreibung der Graphenintegrationsplattform (GIP); https://www.gip.gv.at/assets/downloads/GIP_Standardbeschreibung_2.3.pdf (22.01.2021).
- ÖVDAT (Österreichisches Institut für Verkehrsdateninfrastruktur) (Hrsg.) (2020): GIP.at. Die Graphenintegrations-Plattform GIP. Das Referenzsystem der öffentlichen Hand für Verkehrsinfrastrukturdaten; <https://www.gip.gv.at/> (22.01.2021).
- PFAFFENBICHLER P. und TOTH P. (2014): Mobilitätsbedürfnisse einer Alternden Gesellschaft - Optimierung des ÖPNV-Angebots in Wiener Randlagen mittels Alternativer Bedienformen (AGORA). – Endbericht, Technische Universität Wien, Wien.
- RAUCH S. und RAUH J. (2016): Verfahren der GIS-Modellierung von Erreichbarkeiten für Schlaganfallversorgungszentren. – In: Raumforschung und Raumordnung 74 (5), 437-450.
- SIEDENTOP S., ROOS S. und FINA S. (2013): Ist die „Autoabhängigkeit“ von Bewohnern städtischer und ländlicher Siedlungsgebiete messbar? Entwicklung und Anwendung eines Indikatorenkonzepts in der Region Stuttgart. – In: Raumforschung und Raumordnung 71 (4), 329-341.

Statistik Austria (Hrsg.) (2019): Umweltgesamtrechnungen. Modul Öko-Steuern 2018 (Zeitreihe 1995 bis 2018). Projektbericht. – Wien.

Statistik Austria (Hrsg.) (2020): Bevölkerung im Jahresdurchschnitt; https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/bevoelkerungsstand_und_veraenderung/bevoelkerung_im_jahresdurchschnitt/index.html (04.11.2020)

Umweltbundesamt GmbH (Hrsg.) (2019): Klimaschutzbericht 2019. Analyse der Treibhausgas-Emissionen bis 2017. – Wien. (= Report Rep-0702).

UNGER F. (2015): Die Stadt der kurzen Wege? - Einsatz von GIS zur Analyse der nahmobilen, fußläufigen Erreichbarkeit der Nahversorgung in Wien. – Masterarbeit, Universität Wien, Wien.

WIFO (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung) (Hrsg.) (2016): COSTS - Leistbarkeit von Mobilität in Österreich. – Wien.

WINTER S. (2019): Geoinformation zur Navigationsunterstützung. – In: SESTER M. (Hrsg.): Geoinformatik. Handbuch der Geodäsie. – Hannover, 69-89.

WKO (Wirtschaftskammer Österreich) (Hrsg.) (2017): Ökologisierung des Verkehrs. Aktuelle Alternativen. Verkehr und Umwelt. – Wien.

WKO (Wirtschaftskammer Österreich) (Hrsg.) (2019): Ökosteuern. Analyse der Abteilung für Finanz- und Steuerpolitik. – Wien.

WKO (Wirtschaftskammer Österreich) (Hrsg.) (2020): Abgaben und Steuern. Die betriebliche Verwendung von PKW, Kombi und LKW. – Wien.

XIAOTANG X. (2009): Bus Trip Optimization at Directional Level in GIS. – Masterarbeit, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift